



**REPÚBLICA DE CUBA.
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS.
FACULTAD DE INGENIERÍA.**

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO:

**ESTUDIO BÁSICO PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON
ENERGÍA EÓLICA PARA LA REPÚBLICA DE YIBUTÍ.**

AUTOR: KADER ABDOURAHMAN ABDILLAHI

TUTORES: Dr. JOSÉ PEDRO MONTEAGUDO YANES

Dr. JULIO GÓMEZ SARDUY

**AÑO 56 DE LA REVOLUCIÓN
CIENFUEGOS 2014**

❖ *PENSAMIENTO*

Podrás medir el cielo y la tierra, pero nunca la mente humana.

PROVERBIO CHINO

❖ DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres ya que esperan de mí todo, al igual que los padres del mundo de sus hijos. Yo soy para mis padres, y ellos para mí, el placer de los ojos. Espero estar a la altura de las perspectivas que tuvieron de mí.

❖ *AGRADECIMIENTOS*

Quiero expresar mi gratitud profunda a Dios por haberme guiado a escoger el camino correcto ya que si no fuera por él no sería lo que soy. Quiero agradecer también a todos los que me han ayudado durante la carrera y a llevar a cabo este trabajo. Su dedicación e incansable esfuerzo me han enseñado mucho para enfrentar los desafíos de la vida.

En especial deseo agradecer a los siguientes:

A mis padres por creer y confiar mucho en mí.

Al Dr. José Pedro Monteagudo Yanes por sus consejos y su amabilidad.

Muchas Gracias

RESUMEN

❖ RESUMEN

La Republica de Yibuti no posee recursos naturales conocidos como el carbón, petróleo y gas natural. Debido a un precio cada vez más alto de los combustibles convencionales, y sus consecuencias como impacto negativo en el medio ambiente, el gobierno de este país busca desesperadamente otras alternativas como fuente de energía para satisfacer su demanda de energía eléctrica.

Se están realizando investigaciones científicas, por petición gubernamental, como este trabajo para estudiar las posibilidades de aprovechamientos de las diferentes energías renovables abundantes en la región de Yibuti, para suplir las producciones de energía eléctrica con combustibles fósiles, y también alcanzar con la misma una independencia energética fuera del territorio nacional.

Atendiendo al planteamiento, este trabajo consiste en estudiar la factibilidad técnica y económica del uso de las fuentes renovables de energía en Yibuti para alcanzar cierta independencia energética y a su vez la protección del medio ambiente.

En esta investigación, se demuestra que la Republica de Yibuti posee la capacidad de satisfacer todas sus necesidades energéticas mediante el uso de las energías renovables. Los parques eólicos diseñados son capaces de abastecer el 66% de la demanda energética anual del país o sea de producir e inyectar anualmente 244 872,33 MWh a la red eléctrica nacional. Se evitara también la contaminación de la atmosfera con 173 859 toneladas de CO₂ contribuyen así el desarrollo ambiental de la región. El presupuesto financiero necesario para la realización del proyecto eólico asciende a 143 600 000 USD. Mediante una tarifa de venta de energía eléctrica, origen eólico, de 28 cent\$/kWh se obtiene un periodo de recuperación de 4 años de la inversión inicial con un ingreso total de 513 452 361 US\$ al final de su vida útil estimada a 20 años.

PALABRAS CLAVES: Yibuti, Energía Renovable, Parques Eólicos, Medio Ambiente

ÍNDICE

❖ INTRODUCCIÓN.....	1
❖ Problema científico.....	2
❖ Hipótesis:.....	2
❖ Objetivo:.....	2
❖ Objetivos específicos:.....	2
CAPÍTULO I: Tendencias en el uso de energía eléctrica con tecnología eólica. Marco regulatorios para sistemas eléctricos nacionales.	3
1.1 Introducción al capítulo	3
1.2 Uso de combustibles fósiles.....	3
1.3 Energía renovable	4
1.3.1 Evolución histórica de la energía renovable.....	4
1.3.2 Uso de las fuentes renovables en la generación de energía eléctrica	5
1.4 Energía eólica como fuente alternativa.....	6
1.4.1 Uso de la energía eólica en la energización eléctrica	7
1.4.2 Las tecnologías utilizadas en los aerogeneradores	8
1.5 Estado actual del marco regulatorio para el uso de la energía renovable	13
1.5.1 Escenario regulatorio internacional	13
1.5.2 Medidas de apoyo adoptadas en el plano internacional	14
1.5.3 Medidas de apoyo adoptadas en el plano nacional.....	16
1.6 Desarrollo de las energías renovables en Yibuti.....	17
1.6.1 La energía geotérmica	18
1.6.2 La energía solar	19
1.6.3 La energía eólica.....	20
1.6.4 La energía mareomotriz.....	20

1.6.5	La interconexión de energía hidroeléctrica con Etiopia	22
❖	Conclusiones parciales	23
CAPÍTULO II: Caracterización energética de la República de Yibutí		24
2.1	Introducción al capítulo	24
2.2	La República de Yibuti	24
2.2.1	Historia de Yibuti	24
2.2.2	Ubicación geográfica de Yibuti.....	25
2.2.3	Desarrollo demográfico y social de Yibutí.....	26
2.2.4	La economía de Yibuti	27
2.3	Características técnicas del sistema de generación eléctrico de la nación.....	28
2.3.1	Producción de energía eléctrica en los centrales electrógenos	28
2.3.2	Red de transporte y distribución de electricidad de EDD.	31
2.3.3	Producción de energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas.....	32
2.3.4	Características de las líneas de interconexión.	33
2.4	Antecedentes de la energía eólica en la región de Yibutí.	34
2.4.1	Evolución histórica del uso de la energía eólica en Yibuti.	34
❖	Conclusiones parciales	36
CAPÍTULO III. Potencialidades técnicas de los sistemas de generación eólico para Yibuti.		37
3.1	Introducción al capítulo.	37
3.2	Determinación de los parámetros básicos del sistema de generación eólico en Yibuti.....	37
3.2.1	Medición de velocidad del viento.....	37
3.2.2	Tratamiento de los datos del viento.....	41
3.2.3	Energía anual generada de un aerogenerador.	46
3.2.4	Factor de capacidad de las plantas eólicas.....	49

3.2.5	Diseño del parque eólico.	51
3.2.6	La conexión eléctrica de los parques eólicos con la red eléctrica del país.	55
3.2	La contribución energética de los parques eólicos a la demanda eléctrica de la nación.	58
❖	Conclusiones Parciales	60
CAPÍTULO IV: Estudio Económico.....		61
4.1	Introducción al capítulo	61
4.2	Costo de las instalaciones eólicas	61
4.2.1	Costos de inversión.....	61
4.3	Ingreso de las instalaciones renovables	67
4.4	Criterio de rentabilidad	68
4.5	Análisis económico desde el punto de vista ambiental.....	73
4.6	Impacto ambiental de los parques eólicos	75
4.6.1	Impacto ambiental de los parques eólicos	75
❖	Conclusiones Parciales	78
❖	CONCLUSIONES GENERALES	79
❖	RECOMENDACIONES	80
❖	BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXO: 1 Instrumentación para la medición de viento.....		83
ANEXO: 2 Fichas técnicas del aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW.....		87
ANEXO: 3 Potencias generadas del aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW. Región de Grande Bara.....		89

INTRODUCCIÓN

❖ INTRODUCCIÓN

La generación mundial de energía eléctrica, tan importante para el desarrollo humano, se ha incrementado durante los últimos cincuenta años a un ritmo varias veces superior al del crecimiento de la población.

Más del 65% de este consumo lo satisfacen plantas termoeléctricas que queman carbón, gas o petróleo. Además, la combustión de tales combustibles fósiles produce gases, como el dióxido de carbono (CO_2), cuyo efecto invernadero induce el incremento de la temperatura de la superficie del planeta provocando el ascenso del nivel de los mares, entre otras consecuencias nefastas a escalas local y global.

Para enfrentar estos problemas, la humanidad necesita desarrollar y aplicar tecnologías generadoras de electricidad basadas en fuentes renovables de energía, y que no emanen a la atmósfera gases de efecto invernadero. Entre las fuentes de energía, la eólica, en referencia a Eolo, el dios de los vientos en la mitología griega, se destaca en varios aspectos decisivos tales como: es renovable, abunda en muchas regiones del planeta y la tecnología para su aprovechamiento está disponible. Además esta energía no emite gases de efecto invernadero ni otros contaminantes ambientales.

La República de Yibuti no posee yacimientos descubiertos y explotados de carbón, petróleo y gas natural. Por este motivo y por la cuestión ambiental también, la política energética del gobierno de Yibuti ha centrado todo su interés para promover el uso de la energía renovable y así ser el primer país de África en 2020 (Afriquinfos, 2013) en abastecer el 100% de sus necesidades energéticas con las energías verdes.

Las altas velocidades de vientos en diferentes regiones de Yibuti permiten el desarrollo de la energía eólica para la producción de energía eléctrica.

❖ Problema científico

Yibutí, región africana en vías de desarrollo satisface sus requerimientos energéticos a partir de centrales electrógenas a base de combustibles fósiles. Actualmente la gran parte de la producción de energía eléctrica se realiza a partir de centrales hidroeléctricas desde la vecina Etiopía. La carencia de una fuente de generación barata y segura que satisfaga las necesidades de la nación obliga a estudios que posibiliten el desarrollo energético de forma sustentable, y de reducido impacto ambiental.

❖ Hipótesis:

Las altas velocidades de los vientos en Yibutí ofrecen altas posibilidades a la generación eléctrica basada en la energía eólica como una alternativa de independencia energética de Yibutí.

❖ Objetivo:

Determinar la factibilidad técnica y económica de utilización de la energía eólica en Yibuti.

❖ Objetivos específicos:

1. Resumir las tendencias actuales para la generación de energía eléctrica con tecnología eólica en sistemas internacionales de suministro eléctrico. Criterios de los marcos regulatorios nacionales e internacionales sobre el uso de la energía renovable.
2. Caracterizar la viabilidad del uso de la energía eólica en Yibutí.
3. Evaluar las potencialidades técnicas de generación eléctrica con sistema eólico en Yibutí.
4. Cuantificar la factibilidad económica del anteproyecto.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I: Tendencias en el uso de energía eléctrica con tecnología eólica. Marco regulatorios para sistemas eléctricos nacionales e internacionales.

1.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se realizará una breve revisión bibliográfica sobre la energía renovable y su desarrollo como fuente alternativa en la producción de energía eléctrica. También se abordarán las diferentes tecnologías usadas en la energía eólica a nivel mundial. Por último se analizará el marco regulatorio para sistemas eléctricos a nivel nacional e internacional.

1.2 Uso de combustibles fósiles

En el presente se utilizan los combustibles fósiles como el 97% de la energía primaria que se consume en el mundo, 38% es carbón, 40% es petróleo y 19% es gas natural.

Se les utiliza en transporte, para generar electricidad, para calentar ambientes, para cocinar, etc. Más del 65% (Díez, Energías Alternativas, 2003) de este consumo lo satisfacen plantas termoeléctricas que queman carbón, gas o petróleo. La demanda creciente de estos combustibles no renovables ha desatado un continuo aumento de los precios que afecta a la economía mundial. Además, la combustión de tales combustibles fósiles produce gases, como el dióxido de carbono (CO₂), cuyo efecto invernadero provoca el incremento de la temperatura de la superficie del planeta, lo cual trastorna cada vez más los regímenes de lluvia, acrecienta la ocurrencia de huracanes y provoca el ascenso del nivel de los mares, entre otras consecuencias nefastas a escalas local y global.

Estas generan contaminación y no son renovables. Se estima que el petróleo durará 45 años más, el gas natural 65 y el carbón 230. No obstante, existen diversas opciones de generación eléctrica ajenas a los combustibles fósiles que podrían mitigar la dependencia que la sociedad moderna tiene de estos recursos escasos y contaminantes.

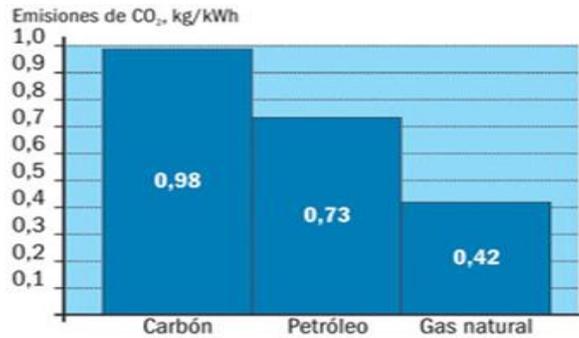


Fig. 1.1. Emisiones de CO₂ de las plantas termoeléctricas actuales, en kg/kWh. (Fuente: Cubasolar)

1.3 Energía renovable

Una **energía renovable**, o más precisamente una *fuentes de energía renovable* es aquella energía que posee la capacidad de renovación mediante procesos naturales, y representa la solución más adecuada para suplir las energías o fuentes energéticas actuales como los combustibles fósiles, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de renovación.

1.3.1 Evolución histórica de la energía renovable

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica. La navegación a vela, los molinos de viento o de agua y las disposiciones constructivas de los edificios para aprovechar la del sol, son buenos ejemplos de ello.

Con el invento de la máquina de vapor por James Watt, se van abandonando estas formas de aprovechamiento, por considerarse inestables en el tiempo y caprichosas y se utilizan cada vez más los motores térmicos y eléctricos, en una época en que el todavía relativamente escaso consumo, no hacía prever un agotamiento de las fuentes, ni otros problemas ambientales que más tarde se presentaron.

Hacia la década de años 1970 las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada (a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación) como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias, y por esta razón fueron llamadas

energías alternativas. Actualmente muchas de estas energías son una realidad, no una alternativa, por lo que el nombre de *alternativas* ya no debe emplearse.

1.3.2 Uso de las fuentes renovables en la generación de energía eléctrica

El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. El concepto de "crisis energética" aparece cuando las fuentes de energía de las que se abastece la sociedad se agotan. Un modelo económico como el actual, cuyo funcionamiento depende de un continuo crecimiento, exige también una demanda igualmente creciente de energía. Puesto que las fuentes de energía fósil y nuclear son finitas, es inevitable que en un determinado momento la demanda no pueda ser abastecida y todo el sistema colapse, salvo que se descubran y desarrollen otros nuevos métodos para obtener energía: éstas serían las energías alternativas.

Las fuentes renovables de energía no contaminantes o limpias son:

- La llegada de masas de agua dulce a masas de agua salada: energía azul
- El viento: energía eólica
- El calor de la Tierra: energía geotérmica
- Los ríos y corrientes de agua dulce: energía hidráulica
- Los mares y océanos: energía mareomotriz
- El Sol: energía solar
- Las olas: energía mareomotriz

Representan un 20% del consumo mundial de electricidad, siendo el 90% de origen hidráulico. El resto es muy marginal: biomasa 5,5%, geotérmica 1,5%, eólica 0,5% y solar 0,05% (Wikipedia, Energía eólica, 2012).

Alrededor de un 80% de las necesidades de energía en las sociedades industriales occidentales se centran en torno a la industria, la calefacción, la climatización de los edificios y el transporte (coches, trenes, aviones). Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones a gran escala de la energía renovable se concentra en la producción de electricidad.

1.4 Energía eólica como fuente alternativa

La **energía eólica** es la energía obtenida de la fuerza del viento, es decir, mediante la utilización de la energía cinética generada por las corrientes de aire.

La energía eólica puede ser considerada como un derivado de la energía solar, debido a que el planeta tierra siempre está expuesto al calor del sol, pero no es calentado de manera uniforme debido especialmente a su inclinación y a su forma (mayormente esférica), esta es la razón por la que es más caliente en la zona ecuatorial y sus puntos más fríos están ubicados en los polos. Esta diferencia térmica produce una transferencia de energía de los puntos más calientes a los más fríos, esta transmisión nunca termina y es la razón por la cual se genera el viento (Fig. 1.2).

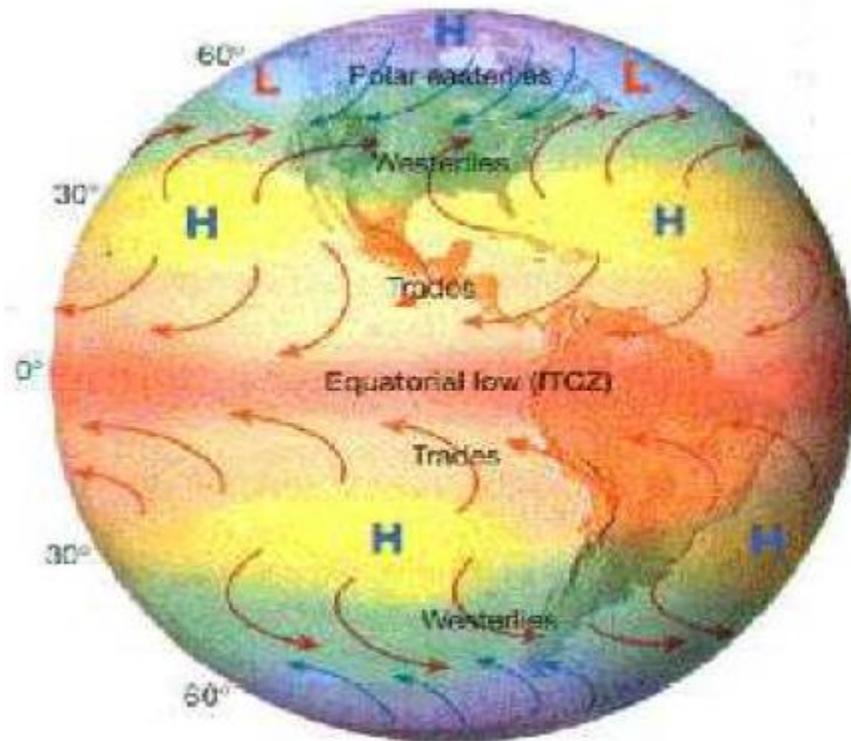


Fig.1.2. Movimiento cinético del viento.

1.4.1 Uso de la energía eólica en la energización eléctrica

El desarrollo de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad debe hacerse por medio de mapas eólicos (ver figura 3.1) para localizar las zonas perspectivas para esta energía que es renovable, pues abunda en muchas regiones del planeta. La tecnología para su aprovechamiento está disponible, no emite gases de efecto invernadero ni otros contaminantes ambientales, y tampoco requiere grandes áreas de captación. Por todo ello, cada vez más países optan por la producción masiva de electricidad a partir del viento (Fig. 1.3).

A finales de 2013, la capacidad mundial instalada de energía eólica fue de 318 gigavatios. En 2011 la eólica generó alrededor del 3 % del consumo de electricidad mundial. Dinamarca genera más de un 25 % de su electricidad mediante energía eólica, y más de 80 países en todo el mundo la utilizan de forma creciente para proporcionar energía eléctrica en sus redes de distribución, aumentando su capacidad anualmente con tasas por encima del 20 %. En España la energía eólica produjo un 21,1 % del consumo eléctrico en 2013, convirtiéndose en la tecnología con mayor contribución a la cobertura de la demanda, por encima incluso de la energía nuclear.

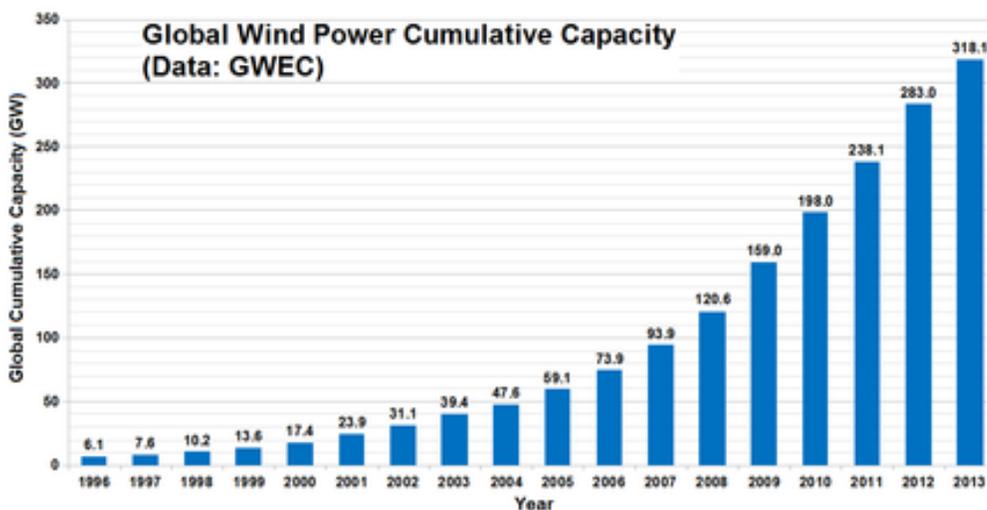


Fig.1.3. La generación de electricidad a partir de la energía eólica crece cada año de manera sostenida. (Fuente: Wikipedia, la enciclopedia libre)

1.4.2 Las tecnologías utilizadas en los aerogeneradores

Después de un rápido proceso de desarrollo que ha durado varias décadas, a lo largo de las cuales se depuraron en el crisol de la práctica muy diversos esquemas de diseño y en los que siempre el elemento fundamental lo constituye la turbina eólica, los aerogeneradores actuales presentan una gran similitud estructural entre sí.

1.4.2.1 *Los aerogeneradores verticales*

Son aquellos en los que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo. También se denominan VAWT (del inglés, Vertical Axis Wind Turbine). Se clasifican generalmente en dos grandes grupos:

➤ Tipo Darrieus

Debe su nombre al ingeniero francés Georges Darrieus, quien patentó el diseño en 1931. Requiere vientos de 4 a 5 m/s, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento.

➤ Tipo Savonius.

Las turbinas Savonius (figura 1.5) son un tipo de turbinas de eje vertical usadas para convertir el poder del viento en torsión sobre un eje rotatorio. Fueron inventadas por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en 1922. Puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo.



Fig. 1.4. Turbina Darrieus



Fig. 1.5. Turbina Savonius.

- Ventajas y desventajas de los aerogeneradores verticales

Sus ventajas son:

- No necesitan torre, por lo que la instalación y mantenimiento de los sistemas de generación es más fácil.
- No necesitan mecanismo de orientación para orientarse respecto al viento

Sus desventajas:

- Al estar cerca del suelo la velocidad del viento es baja
- Baja eficiencia
- No son de arranque automático, requieren conexión a la red para poder arrancar utilizando el generador como motor.
- Requieren cables tensores

1.4.2.2 Los aerogeneradores horizontales

Son aquellos en los que el eje de rotación del equipo se encuentra paralelo al suelo. Esta es la tecnología que se ha impuesto, por su eficiencia, confiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias.

- Aerogeneradores monopalas

La razón para una turbina eólica monopala es disminuir con una alta velocidad rotatoria el número de palas del rotor, la tendencia de rotación del rotor y por este las masas de la maquinaria. Adicionalmente la pala del rotor puede fijarse al centro por una sola bisagra que permite un fuese de movimientos que reducen las cargas estructurales en la misma.

Por otro lado, un rotor monopala tiene principalmente un desequilibrio aerodinámico, que introduce movimientos adicionales, causa cargas y construcciones complicadas en el centro, (bisagras, apagadores, etc.) para tener los movimientos bajo control.

La desventaja principal para su uso comercial es el nivel del ruido aerodinámico relativamente alto del rotor, eso significa que la turbina eólica monopala es algunas veces más ruidosa que una tripala.



Fig. 1.6. Aerogenerador monopala.

➤ Aerogeneradores bipalas

Los diseños bipala aerogeneradores tienen la ventaja de ahorrar el costo de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida y esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual. Últimamente, varios fabricantes tradicionales de máquinas bipala han cambiado a diseños tripala.



Fig. 1.7. Aerogenerador bipala. (Fuente: Nordic)

➤ Aerogeneradores tripalas

La mayoría de aerogeneradores modernos tienen diseños tripala, con el rotor mantenido en la posición corriente arriba (en la cara de la torre que da al viento), usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación.

A este diseño se le suele llamar el clásico "concepto danés", y tiende a imponerse como estándar al resto de conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño.



Fig. 1.8. Aerogenerador tripala.(Fuente: Parque eólico offshore de Thorntonbank en la costa belga, Mar del Norte.)

Según la disposición del rotor con respecto al sentido del viento se dividen en dos subgrupos:

- ✓ Rotor a Barlovento.

Las turbinas eólicas a barlovento son las que poseen el rotor o hélice enfrentando al viento, es decir delante de la torre. La ventaja básica de este tipo de máquinas es que evitan la influencia de la sombra aerodinámica de la torre. Sin embargo, aunque en menor medida que en una configuración a sotavento, existe una pequeña perturbación.

Esto se debe a que en la porción del área del rotor que enfrenta a la torre se induce, igualmente, una variación en el patrón normal de variación presiones a lo largo de las líneas de flujo que atraviesan dicho sector.



Fig. 1.9. Rotor a barlovento

✓ Rotor a Sotavento

En este sistema, el rotor se encuentra aguas debajo de la torre, detrás de esta respecto a la dirección del viento y posee la fundamental ventaja de no requerir dispositivo de orientación alguno, siempre y cuando se diseñe adecuadamente el rotor y la góndola de tal modo que haga que la misma "siga" de forma pasiva a la dirección del viento. Sin embargo esta manera de orientar a la hélice se ve obstaculizada por la forma en que se puede transmitir la corriente saliente desde el generador porque una vinculación directa por medio de cables necesita un control activo del enroscado de los mismos (si la góndola ha girado repetidamente en el mismo sentido por un largo período de tiempo) y una por medio de anillos rozantes debe ser muy bien estudiada dadas las elevadas intensidades de carga que serán transmitidas.



Fig. 1.10. Rotor a sotavento.

1.5 Estado actual del marco regulatorio para el uso de la energía renovable

El marco regulatorio es un concepto muy general dentro del sistema de referencias de las doctrinas del Derecho.

Se puede definir como el conjunto de normas jurídicas (Leyes, Decretos Leyes, Reglamentos, Resoluciones, Manuales, etc...), acuerdos y decisiones de los órganos del estado o el gobierno, mediante las cuales el Poder Estatal le imprime un carácter ordenador y regulador a la actividad energética, en relación con el resto de los elementos integrantes de la sociedad y para lo cual se prevé un nivel dado de vigencia social. Estas normativas y regulaciones materializan la máxima expresión de la voluntad política del Estado y los organismos internacionales, en relación con las acciones presentes y futuras del desarrollo energético y su influencia en el escenario económico y social de la nación.

Internacionalmente suele estar conformado por diversas regulaciones de organismos internacionales, que en la materia de preservación del medio ambiente y los recursos naturales, diseñan políticas y programas que determinan los límites de incidencia e impacto del perfil energético a nivel internacional.

1.5.1 Escenario regulatorio internacional

Tradicionalmente casi todos los países poseen una Ley de Energía o Ley Eléctrica, que protege las relaciones sociales derivadas del sistema convencional. En los últimos años casi en todos los países se han publicado leyes para regular las relaciones sociales derivadas de algunas de las fuentes renovables de energía (FRE). Venezuela acaba de publicar una Norma Jurídica que protege la eficiencia energética y el ahorro de energía. México y Brasil han impulsado una iniciativa legal para normar el balance neto sobre la energía. En Cuba no existe una Ley de Energía. Ley 1287/75. Ley Eléctrica cubana (no regula ni protege las relaciones sociales derivadas de las FRE, tampoco aborda lo relacionado con la eficiencia y el ahorro de energía) (P & F, 2013).

1.5.2 Medidas de apoyo adoptadas en el plano internacional

En cuanto a las políticas y medidas de apoyo adoptadas en el plano internacional, al menos en 52 países desarrollados y en vías de desarrollo se ha aplicado algún tipo de incentivo directo a la inversión de capital, subsidios, concesiones y devoluciones de impuestos a las importaciones, así como apoyos financieros a nivel nacional y estadual.

Las políticas de apoyo a las FRE, pueden resultar un impulso para el desarrollo energético sostenible.

Se han establecido fondos especiales para las FRE, los que son utilizados directamente para financiar inversiones, ofrecer créditos con bajas tasas de interés o facilitar el desarrollo de mercados destinados a la investigación, educación y calificación y estándares de desempeño.

En los últimos años, una de las industrias de mayor crecimiento en el mundo, a pesar del débil ambiente económico presente, ha sido la de generación de energías renovables. Así, como puede verse en la figura 1.9, la inversión global destinada a esta industria ha crecido notablemente, pasando \$54 USD a \$260 billones USD entre los años 2004 y 2011 (Bondolich).

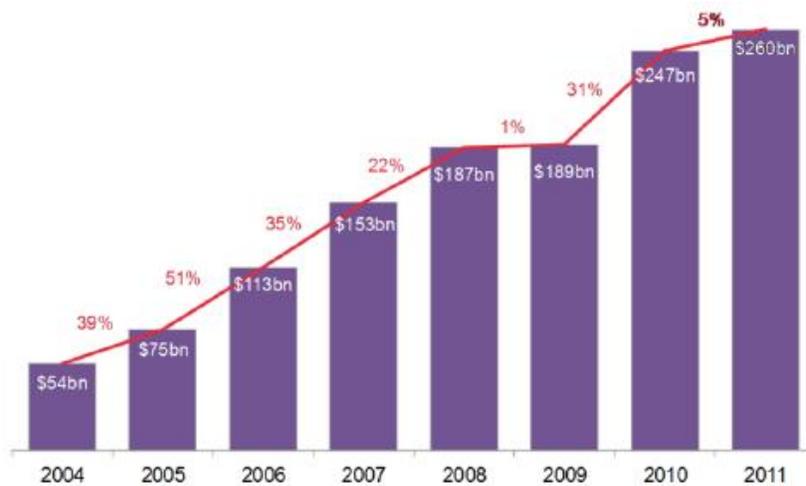


Fig.1.11. Inversión mundial en energías renovables. (Fuente: Bloomberg New Energy Finance, 2012).

Entre las diferentes tecnologías, se destaca la inversión en energía solar, principalmente fotovoltaica, como aquella que más rápido ha crecido, mientras la eólica sobresale como la más madura de la industria por su monto total de inversión.

Tabla 1.1 Crecimiento de la inversión mundial en energías renovables, por tecnología. (Fuente: The Clean Energy Report, 2011)

Tecnología	Tasa de Crecimiento Anual (%), 2004-2010
Solar	91
Eólica	43
Marina (mareomotriz, otras)	33
Biocombustibles	23
Biomasa	20
Mini-hidro	19
Geotérmica	12
Investigación y desarrollo	18

Tabla 1.2 Crecimiento de la inversión mundial en energías renovables, por región. (Fuente: The Clean Energy Report, 2011)

Región	Tasa de Crecimiento Anual (%), 2004-2010
Sudamérica	70
Medio oriente y África	57
Asia y Oceanía	48
Norteamérica	41
Europa	25
Mundo	40

1.5.3 Medidas de apoyo adoptadas en el plano nacional

El gobierno de Yibuti trabaja con varias instituciones nacionales e internacionales para evaluar la viabilidad de los recursos de las FRE.

El banco mundial apoya a Yibuti en su búsqueda de energías renovables de bajo precios. Una contribución de 6 millones USD para el proyecto de producción de energía geotérmica fue aprobado en el 5 junio 2013 (Sitienei, 2013) por el Consejo Administrativo del Banco Mundial. Esta contribución ayudará a Yibuti a evaluar la viabilidad del recurso geotérmico situado en la región de Lac-Assal.

El Banco Mundial movilizó varios inversores financieros para cofinanciar el costo total del proyecto que se eleva a 31 millones de dólares , entre ellos están notablemente el Fondo para el ambiente mundial (FEM), el Fondo de la OPEP para el desarrollo internacional (FODI), el Banco Africano de Desarrollo (BAfD), la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD), el Fondo para la Energía Duradera en África (SEFA) y el Plan mundial de Desarrollo Geotérmico (GGDP) a través del intermediario del Programa de ayuda a la gestión del sector energético (PAGE). Las autoridades de Yibuti también aportarán una contribución.

En el plano de la energía eólica, Yibuti se dotará de una primera central eólica, de una capacidad de 60 MW, en el marco del programa de desarrollo energético del país. Un protocolo de acuerdo en este tema fue firmado en Junio de 2013 entre la empresa eléctrica de Yibuti (EDD) y Qatar Petroleum International.

Según el presidente de Qatar Petroleum International, Nasser Al Jaidah, este protocolo de acuerdo representa una nueva fase de la estrategia de Qatar Petroleum International de desarrollar su presencia en el extranjero y en particular en África (Afriqinfos, 2013).

Para apoyar al uso de las fuentes renovables de energía, el gobierno de Yibuti debe establecer marcos regulatorio para las energías renovables, ya que no existen (Ministerio de Energía encargado de Recursos naturales, 2013), para facilitar e incitar a los inversores nacionales e internacionales para invertir los fondos necesarios para aprovechar al máximo las potencialidades energéticas de Yibuti.

Por ejemplo, en España existe un real decreto (RD 436) que obliga a la compañía eléctrica de comprar la energía de origen renovable, fijándose la tarifa del kWh en el 575% sobre la tarifa eléctrica media los primeros 25 años y al 460% a partir de entonces (SÁINZ, 2007).

1.6 Desarrollo de las energías renovables en Yibuti

La República de Yibuti tiene recursos naturales limitados, no posee petróleo ni yacimientos de gas natural. El país es totalmente dependiente del exterior para su aprovisionamiento en carburante con el fin de cubrir sus necesidades energéticas por medio de centrales electrógenas.

Debido a que la totalidad de la producción de energía eléctrica se basa en estas centrales que funcionan con fuel pesado, los precios de electricidad son elevados en el orden de los 49 FD¹/kWh o sea 0,28 US/kWh (Awaleh, 2007).

Confrontado a una demanda en electricidad más elevada cada día y a una urbanización rápida, el gobierno ha decidido orientar la política energética del país sobre el desarrollo de las energías renovables.

La República de Yibuti, con la impulsión del presidente, su excelentísimo, el señor Ismael Omar Guelleh, ha financiado varios proyectos para evaluar los distintos yacimientos de energía renovable, con el motivo de satisfacer todas sus necesidades energéticas y convertirse así en el primer país de África en 2020 (Afriquinfos, 2013) a abastecerse con 100% de energías verdes.

Actualmente hay varios proyectos de energías renovables que están en fases de estudios en modo de alternativa para la producción de energía eléctrica con la colaboración de distintas instituciones nacionales e internacionales.

¹ Francs Djiboutiens (Francos Yibutianos)

1.6.1 La energía geotérmica

La **energía geotérmica** es aquella energía que puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra.

Parte del calor interno de la Tierra (5 000 °C) llega a la corteza terrestre. En algunas zonas del planeta, cerca de la superficie, las aguas subterráneas pueden alcanzar temperaturas de ebullición, y, por tanto, servir para accionar turbinas eléctricas o para calentar.

Yibuti pertenece a los países de la cordillera volcánica Este Africano con Etiopia, Kenia, Tanzania, Uganda y Eritrea y organizó en abril 2004 el primer seminario sobre la explotación de la energía geotérmica (Awaleh, 2007).

En el año 2005, después del encuentro del presidente de Yibuti con el de Islandia, el proyecto del desarrollo geotérmico ha sido confiado a una empresa Islandesa experta en el tema, llamada Reykjavik Energy Invest (EDD, 2014).

El sitio de Lac-Assal, ya estudiado hace varios años, puede ahora con las técnicas modernas ser explotado incluso con su alta salinidad.

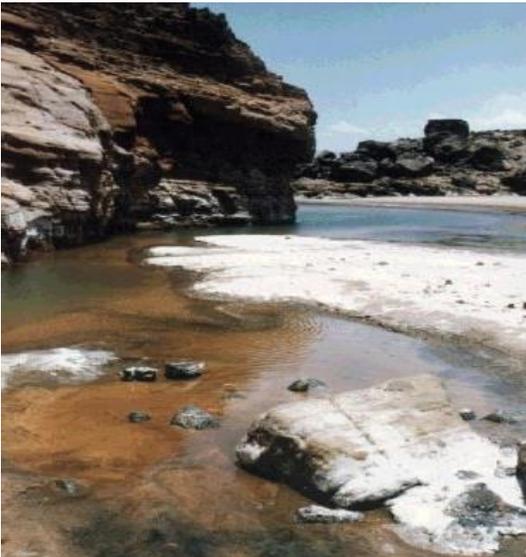


Fig.1.12. Fuente Caliente de Korili. Yibuti

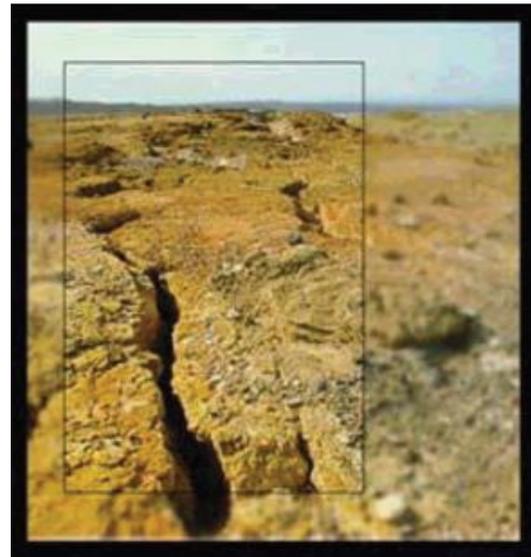


Fig.1.13. Fisura de la Cordillera. Yibuti.

1.6.2 La energía solar

Para el desarrollo de la energía fotovoltaico, Yibutí abrió una cooperativa con Japón por el financiamiento de una central fotovoltaica conectada a la red.



Fig.1.14. Central fotovoltaica del CERD. Yibutí

Este proyecto de una cantidad de quinientos millones de yenes, o 4 150 000€, tiene el objetivo de equipar el CERD² de una central eléctrica que usa la energía solar con una capacidad de 300 kW. Esta capacidad podría alcanzar 400 kW, lo que representa un una proporción no despreciable de la producción de electricidad en la ciudad Yibutí.

La central fotovoltaica con 1 140 paneles extendidos en una superficie de 5 200 m² es la primera central fotovoltaica en la región del Este africano conectado a la red eléctrica. Se prevé de hecho que el CERD aprovecha esta energía para el consumo eléctrico de sus edificios y reinyecta el resto de la producción en la red eléctrica. Los primeros 3 meses, la central fotovoltaica produjo más de 90 MWh de energía eléctrica los cuales se han inyectado 75 MWh a la red eléctrica y 16 MWh fueron usado por el CERD (Priem, 2013).

² CERD: Centre d'Etude et de Recherche de Djibouti (Centro de estudio e investigación de Yibuti)

1.6.3 La energía eólica.

La energía eólica siendo una forma indirecta de la energía solar es objeto de estudio en Yibutí.



Fig.1.15. Grand Bara. Yibutí.

1.6.4 La energía mareomotriz

La **energía mareomotriz** se debe a las fuerzas gravitatorias entre la Luna, la Tierra y el Sol, que originan las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa entre estos tres astros. Esta diferencia de alturas puede aprovecharse en lugares estratégicos como golfos, bahías o estuarios utilizando turbinas hidráulicas que se interponen en el movimiento natural de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable.

La energía mareomotriz es accesible en el paso de Ghoubet en el golfo de Tadjoura en Yibuti donde se está estudiando su factibilidad para generar energía eléctrica y conectarlo a la red nacional.



Fig.1.16. Paso de Goubet con su corriente observada. Yibuti

1.6.5 La interconexión de energía hidroeléctrica con Etiopía

Contrario a Yibuti, que depende de los recursos petroleros para responder a su aumento de demanda eléctrica, Etiopía posee una importante explotación de fuente hidroeléctrica debido al paso del Nilo azul en su territorio. Considerando esta situación, los dos países firmaron acuerdos de interconexión de sus redes eléctricas, para reforzar el acceso d electricidad en Etiopía y en Yibuti gracia a la cooperación regional.

Los trabajos para la interconexión eléctrica empezaron en abril de 2008 con la ayuda del Banco Africano para el Desarrollo y la puesta en marcha del servicio fue en mayo de 2011.



Fig.1.17. Fuente hidráulica de Etiopía.

❖ Conclusiones parciales

1. Las energías renovables hoy en día consiste la única solución viable energéticamente para dar solución a los problemas que llevan en si los combustibles fósiles.
2. La energía eólica es un caso particular de la energía renovable, tiene un crecimiento cada vez mayor en la integración y diversificación en la producción eléctrica mundial.
3. Dinamarca es un ejemplo del desarrollo de esta energía produciendo el 25% de su producción eléctrica mediante aerogeneradores eólicos.
4. A nivel mundial existen marcos regulatorios que favorecen el desarrollo energético de la energía renovable que obligan a las empresas eléctricas la compra de energía eléctrica de origen renovable a 5 o 6 veces por encima de la producida por fuentes convencionales.
5. España es un ejemplo de este estímulo que obliga a la compañía eléctrica a comprar la energía de origen renovable, fijándose la tarifa del kWh en el 575% sobre la tarifa eléctrica media los primeros 25 años y al 460% a partir de entonces.
6. La Republica de Yibuti tiene la capacidad de satisfacer sus necesidades energéticas mediante las energías renovables abundantes en su territorio nacional.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II: Caracterización energética de la República de Yibuti

2.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se realizará una breve presentación de la República de Yibuti y la manera en que este país se ha desarrollado económicamente y socialmente durante los últimos años. Se hará también una descripción del sistema de generación eléctrico de la nación y por último la caracterización de las potencialidades de uso de la energía eólica en la región de Yibuti.

2.2 La República de Yibuti

El área de Yibuti ha sido ocupada por varias etnias e influida principalmente por dos culturas: la etíope y la árabe. Actualmente los *afar* o *danaquiles* en los dos tercios septentrionales del territorio y la parcialidad somalí de los *issa* en el tercio meridional coexisten mutuamente en este pequeño estado.

2.2.1 Historia de Yibuti

En el siglo XIX, Francia estableció un protectorado en esta área, llamado *Somalia Francesa* gobernada por Léonce Lagarde. En 1967, el nombre fue cambiado al de *Territorio francés de los Afar y de los Issa*. El 27 de junio de 1977, se le concedió la independencia como Yibuti.

Una guerra civil liderada por rebeldes Afar en los primeros años 1990 fue detenida por un acuerdo de paz en 1994.

Sin embargo, la historia de Yibuti, registrada en la poesía y cantos de sus pueblos nómadas, se remonta miles de años atrás a un tiempo en que los habitantes de esas tierras comerciaban pieles por perfumes y especias de Egipto, India, y China. Es a través de los contactos estrechos con la península arábica por más de 1 000 años, como las tribus Somalí y Afar en esta región se convirtieron en uno de los primeros pueblos en el continente africano en aceptar el Islam. Yibuti es un país musulmán que regularmente toma parte en las reuniones de países islámicos y árabes.

2.2.2 Ubicación geográfica de Yibuti

Yibuti se encuentra en el este de África, bordeando el golfo de Adén y el mar Rojo entre Eritrea y Somalia. Su territorio ocupa una superficie de 23 200 km² (Wikipedia, Energía eólica, 2012), con una población 716 000 habitantes. La ciudades principales son la capital Yibuti (300 000 hab), Tadjoura (30 000 hab), Ali Sabieh (20 000 hab), Obock (10 000 hab) y Dikhil (10 000 hab) (RTD, 2014).

El centro del país es montañoso y divide a Yibuti en la llanura costera y una meseta en el interior. El punto más bajo es el lago Assal (-155 metros), y el más alto es Moussa Ali (2 028 metros). No existen superficies de tierra arable y fértil, irrigación o cosechas permanentes, ni grandes bosques. El 9% del país forma parte de tierras de pastoreo permanente. El clima es desértico con temperaturas medias de 30 °C.



Fig.2.1. Ubicación de Yibuti. (Fuente: Encarta 2009)

2.2.3 Desarrollo demográfico y social de Yibutí

La población total de la República de Yibuti es estimado en 2007 en 734 000 habitantes (PNUD, 2005). Esta llegaría 850 907 habitantes en 2012 sobre la base de un crecimiento medio de 3% por año. La población es relativamente joven, los menos de 15 años representa 40% de la población total. Los jóvenes de 10 a 24 años representan 33,5% de la población total. Según esta estadística, el 95% es de raza negra y el restante 5% está compuesto por blancos (de origen francés e italiano) y árabes. Los idiomas oficiales son el francés y el árabe.

Dos tercios de sus habitantes viven en la capital, y el tercio restante, compuesto principalmente por pastores nómadas, en los distritos del país.

Los principales grupos poblacionales son los Afar, que viven en el Norte y en el Oeste y representan 37% de la población, y los somalíes (Issa y Gadaboursi, 47% de la población Yibutiana) ubicados de manera masiva en la capital. El Sur acoge una minoridad Yemenitas. Se encuentra en Yibuti también algunos europeos, debido a las bases militare extranjeras, 50 000 refugiados Etíopes y hasta 100 000 refugiados somalíes.

La tasa demográfica de Yibuti es de 2.3% (media 1992-2002, OMS) con una esperanza de vida de 52 años (UNSTATS, 2004) y tasa de alfabetización 64,6% (UNSTATS, 2005).

La cultura de Yibuti es muy parecida a la de sus vecinos. Además la larga dependencia de Francia ha dado rasgos propios a la cultura yibutiana. La cultura islámica influye mucho ya que la población es musulmana en un 94 %, mientras que el porcentaje de cristianos, principalmente europeos, es sólo del 6 %. Aunque el francés y el árabe son los idiomas oficiales, además, el somalí y el afar están muy extendidos.

2.2.4 La economía de Yibuti

La economía de Yibuti está basada principalmente en servicios relacionados con la localización estratégica del país y su condición de zona de libre comercio en el noreste africano. El puerto de Yibuti es vital para la economía nacional, genera alrededor de \$ 982 millones (Maritime Information Services Ltd, 2014) debido a su ubicación estratégica en el Mar Rojo, una de las rutas marítimas más transitadas e importantes del mundo.

El puerto también se utiliza no sólo como una puerta de enlace vital para Etiopía sin salida al mar en el sur, sino como un centro para el comercio debido a los países en la costa oriental del continente africano.

En 2000, DP World, el operador de la terminales de contenedores con sede en Dubái, y el gobierno de Yibuti establecieron un acuerdo bilateral para operar el puerto de Yibuti y desarrollar la nueva plataforma del terminal de contenedores de Doraleh en Yibuti. Con 18 metros de aguas profundas de y 1 050 metros cuadrados, el terminal de Doraleh es capaz de recibir los grandes barcos de mercancías de hasta 15 000 contenedores. Actualmente la capacidad anual de la terminal se duplicó a cerca de 3 millones de TEU (Maritime Information Services Ltd, 2014) tras la finalización de un proyecto de desarrollo de EE.UU. \$ 300millones en 2015, Aboubaker Omar Hadi, director ejecutivo de la autoridad, dijo a Bloomberg que se está en conversaciones con China, el Banco Mundial y el Banco Africano de Desarrollo sobre el proyecto y que Yibuti es un pequeño mercado, pero se está aumentando el tráfico hacia el interior del país.



Fig.2.2. Puertos de Yibuti.

2.3 Características técnicas del sistema de generación eléctrico de la nación

La Republica de Yibuti en recursos naturales limitados no posea petróleo, ni gas, ni carbono. El país es totalmente dependiente del exterior para su aprovisionamiento en combustibles. La energía del país se asegura mediante una empresa pública, creada en enero de 1960, a carácter industrial y comercial bajo la autoridad actualmente del Ministerio de Energías y Recursos Naturales. Esta empresa dotada de la personalidad moral y de autonomía financiera es llamada *Electricité de Djibouti* (EDD).

2.3.1 Producción de energía eléctrica en los centrales electrógenos

La empresa eléctrica EDD tiene un monopolio legal de la producción y distribución de la energía eléctrica en todo el territorio nacional por medio de grupos electrógenos. Existen dos centrales de generación eléctrica, la central de Boulaos y la central de Marabout II. Estas dos centrales trabajan con 19 generadores cilíndricos en V o en línea funcionando en base de diésel, fuel pesado o gasolina. La capacidad instalada hasta ahora es de 119 MW. La capacidad producida en 2011 es de 50 MW por causa de no disponibilidad de algunos generadores por avería e incendio del generador 25 a finales del año 2010.



Fig.2.3. Generadores G18 y G22 de la central de Boulaos.

Tabla 2.1: Producción eléctrica nacional de 1986 a 2012 en MWh con los picos de máximos observados en MW. (Fuente: EDD)

Periodo	Energía Producida	Pico máximo
1986	164 010	34,5
1987	173 400	33,4
1988	185 940	36,85
1989	180 100	35
1990	193 140	36,55
1991	197 580	38,3
1992	206 043	38,2
1993	213 615	39,6
1994	216 667	41,5
1995	217 767	40
1996	202 493	41,9
1997	196 138	40,8
1998	146 468	32,8
1999	184 388	38,1
2000	226 322	39,7
2001	234 310	41,34
2002	247 640	42,7
2003	260 660	45,98
2004	274 365	48,15
2005	297 977	53,49
2006	307 483	52,90
2007	322 974	55,70
2008	317 324	56,92
2009	340 156	60,53
2010	372 030	65,46
2011	372 006	70,40
2012	386 994	75,00

En la figura 2.4, Se observa que en la producción eléctrica ha estado siempre creciendo reflejando el desarrollo económico y social del país. Se puede observar también que la curva perdió su ascenso a partir del año 1996 hasta la pérdida brutal de la producción debido al incendio de la central de Boulaos en 1998 y 1999 (parte señalado por el círculo).

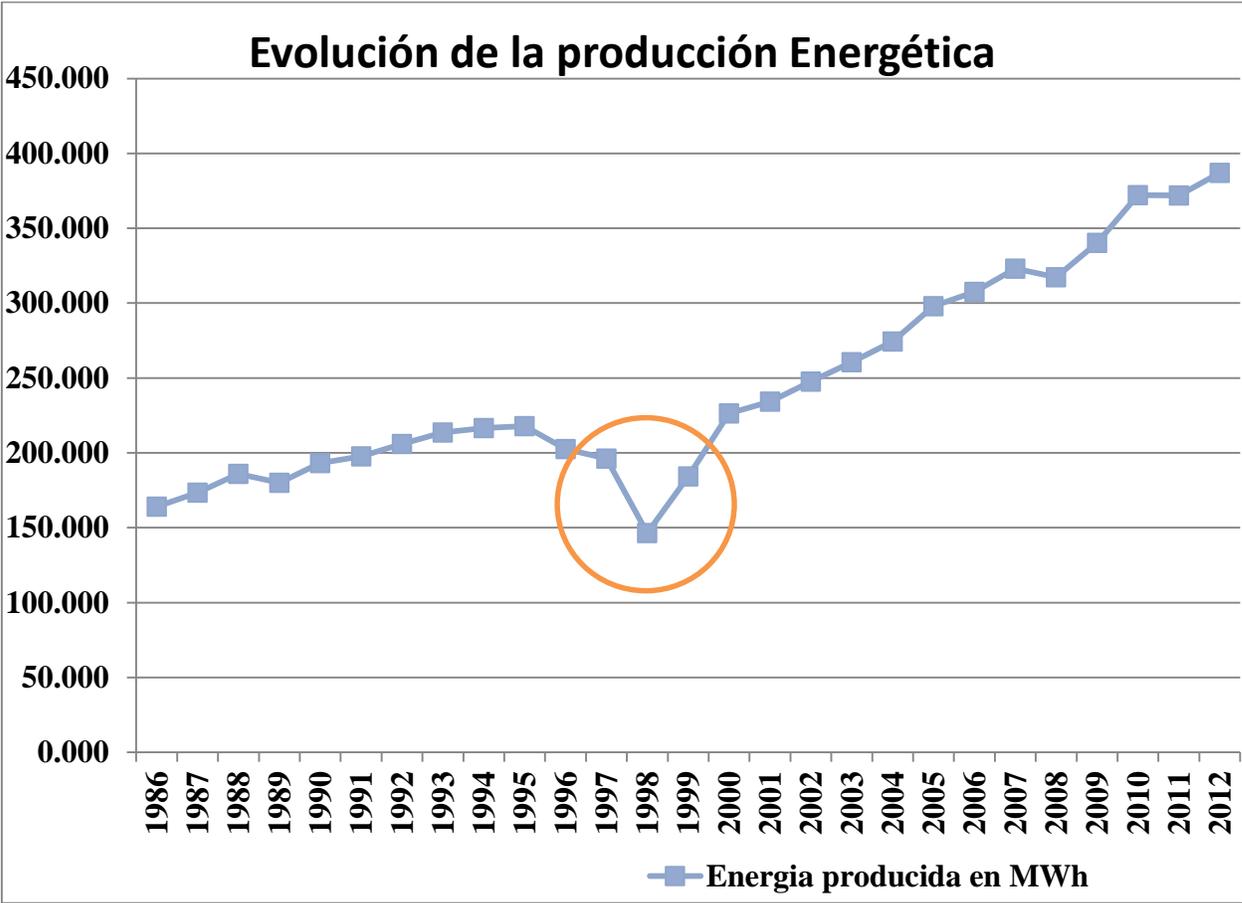


Fig.2.4. Evolución de la producción energética de Yibuti 1986-2012. (Fuente: EDD)

2.3.2 Red de transporte y distribución de electricidad de EDD.

La potencia instalada es aproximadamente de 100 MW. Esta potencia es distribuida al 95% en la ciudad de Yibuti solamente, donde se concentra el 2/3 de la población de Yibuti, y el 5% restante en los otros distritos del interior.

La red de transporte y de distribución representa (EDD, 2014):

- ✓ 4 800 metros de red de alta tensión
- ✓ 244 844 metros de red de media tensión
- ✓ 331 277 metros de red de distribución
- ✓ 63 227 metros de red de iluminación público

La empresa eléctrica EDD le brinda a energía eléctrica alrededor de 33 485 clientes que se reparten en la siguiente manera (datos del año 2005):

- ✓ 581 clientes ³MT (o grandes consumidores BT)
- ✓ 32 904 clientes BT



Fig.2.5. Red de distribución.

³ MT: Media Tensión; BT: Baja Tensión

2.3.3 Producción de energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas.

Debido a los precios de los combustibles fluctuantes y elevados, el gobierno de Yibuti siempre ha buscado una forma alternativa de producir energía eléctrica con un precio razonable y adecuado para satisfacer el aumento de su demanda eléctrica. Esta alternativa tiene como objetivos principales mejorar el nivel de vida de la población Yibutiana y facilitar así el desarrollo económico e industrial de los sectores privados en Yibuti.

Un proyecto de interconexión de redes eléctricas entre Yibuti y el vecino Etopíe fue iniciado en una reunión sobre la cooperativa regional en Yibuti en marzo 1985. Debido a varias causas, el proyecto se paró hasta marzo 1999.

En noviembre de 1999 la Republica de Yibuti y la Republica Federal y democrática de Etiopía empezaron de nuevo el proceso firmando un acuerdo de cooperación sobre la interconexión eléctrica entre los dos países. Finalmente los trabajos de instalación empezaron en abril de 2008 y se inauguró en mayo de 2011 (EDD, 2014). Actualmente, la producción de energía eléctrica por la empresa EEPCO⁴ mediante centrales hidroeléctricas cubren más del 90 % de la demanda energética (EDD, 2014). La energía eléctrica es importada de Etiopía a una baja tarifa que oscila entre 6 y 7 USD cent/kWh (Partnership, 2013).



Fig.2.6. Producción de energía eléctrica por sectores. (Fuente: EDD)

- Ventajas del proyecto de interconexión eléctrica.

⁴ Ethiopian Electric Power Corporation

- Precio de energía baja en Yibuti.
- Una repartición más económica de las cargas temporáneas por una utilización óptima de diferencias de las características de cargas.
- Un calendario de mantenimiento más flexible.

2.3.4 Características de las líneas de interconexión.

El proyecto ha permitido la construcción de tres líneas dobles monótona (EDD, 2014):

- ✓ Una línea de transporte de energía doble monótona a 230 kV largo de 283 km (201 km en territorio etíope y 82 km en territorio Yibutiano) entre la ciudad de Dire Dawa (Etiopia) y PK12 (Yibuti). La capacidad de transito es de 400 MVA o sea 200 MVA por tramo.
- ✓ Una línea doble monótona a 63 kV de 79 km entre la ciudad de Yibuti y el distrito de Ali-Sabieh. La capacidad de transito es de 60 MVA o sea 30 MVA por tramo.
- ✓ Una línea doble monótona a 63 kV de 8,7 km entre PK12 y el Palmaraiie (EDD). La capacidad de transito es de 160 MVA o sea 80 MVA por tramo.

El proyecto permitió también la construcción de un banco de transformadores de 230/63/20 kV en PK12. La capacidad instalada es de 263 MVA en 230/63 kV.



Fig.2.7. Líneas de interconexión.

2.4 Antecedentes de la energía eólica en la región de Yibutí.

El uso de las energías renovables no es una cosa nueva en la región de Yibuti. La población Yibutiana ha ido utilizando, incluso antes su independencia, este tipo de fuente energética de forma directa o indirecta en su vida cotidiana. La energía eólica se utilizaba, y sigue utilizándose hasta el día de hoy, como una fuerza de propulsión mediante una vela en pequeños carros de carrera, sin mencionar los barcos a velas para la pesca, como actividades turísticas, en el valle de Grand Bara.

2.4.1 Evolución histórica del uso de la energía eólica en Yibuti.

El uso de la energía eólica no es una cosa nueva en el País. El primer molino a viento fue introducido en 1920 (Awaleh, 2007) por la empresa de explotación de sal, *Saline de Djibouti*. Estos molinos, con largas palas (figura 2.8), se utilizaban para el bombeo de agua del mar hasta los estanques de cristalización para la producción de sal.

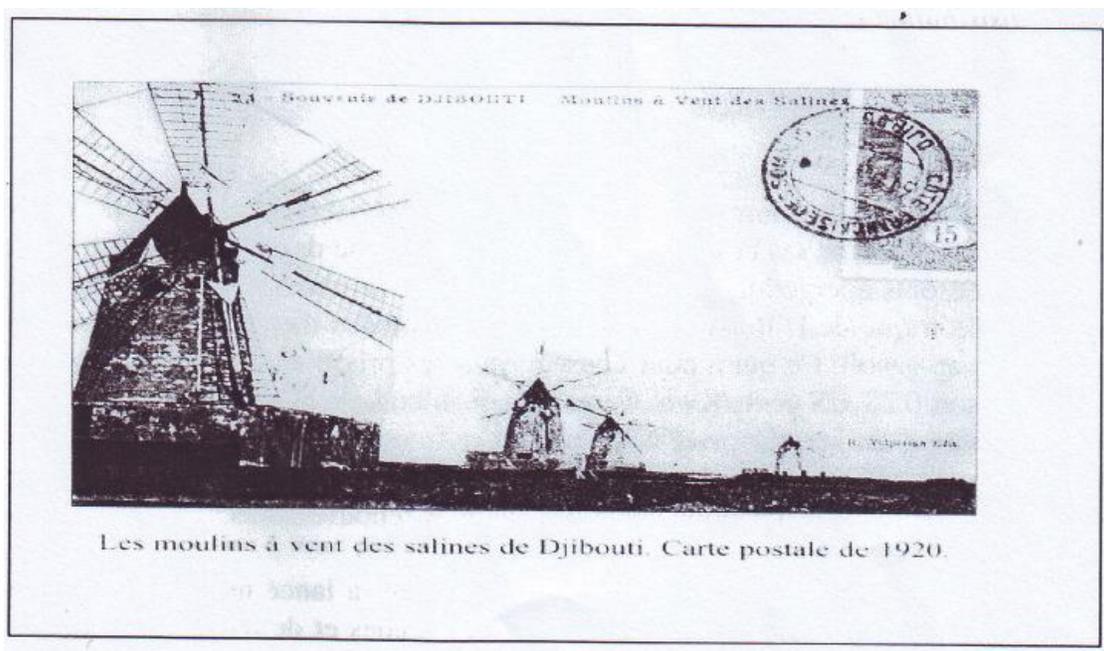


Fig.2.8. Molinos a viento de *Saline de Djibouti*.

En 1965, algunas turbinas eólicas fueron introducidas en Yibuti para el bombeo de agua de irrigación. Después de la independencia, 27 de junio de 1977, en 1983-84, la ISERST, llamado actualmente CERD (Centre d' étude et de recherche de Djibouti) por su sigla en francés, empezó un proyecto de medición de velocidad en el país. El equipo utilizado permitía la medición y el registro de la velocidad media horaria del viento a una altitud de 10 m a partir del suelo. El objetivo era instalar turbinas eólicas pequeña para el bombeo de agua en la agricultura. Excepto el distrito de Tadjourah, velocidades medias de viento de orden de 3.5 hasta 4 m/s fueron observadas como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Velocidad media mensual del viento (m/s) de 1983-84. (Fuente: ISERST)

Mes \ Distritos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	V. media
Yibuti ciudad	4,2	5,7	3,5	3,1	3,3	3,3	3,8	3,8	4,1	3,3	4,5	3,2	3,82
Ali-Sabieh	3,9	4,3	4,0	3,7	2,7	3,0	3,4	2,9	3,4	4,4	5,1	4,7	3,79
Dikhil	4,5	5,7	6,6	5,7	3,5	3,6	3,0	2,6	3,2	5,6	5,8	5,1	4,58
Tadjourah	7,0	6,9	7,6	6,8	6,5	7,9	7,8	6,5	7,5	7,3	7,5	5,7	7,08
Obock	3,3	3,4	4,1	3,0	2,8	3,2	5,0	5,3	3,6	3,4	3,3	4,0	3,70

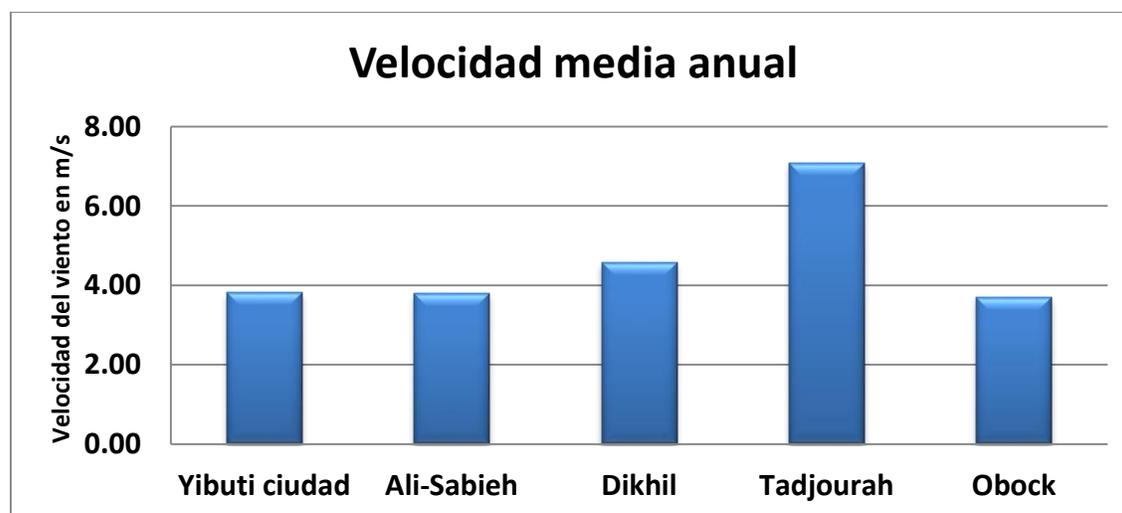


Fig.2.9. Velocidad media anual en Yibuti y sus Distritos en 1983-84. (Fuente: ISERST)

❖ Conclusiones parciales

1. La Republica de Yibuti conoce en los últimos 10 años un desarrollo económico y social creciente. En el año 2012, el banco mundial publicó un comunicado en el cual Yibuti estaba dentro los 10 países del mundo que tienen un desarrollo económico cada vez mayor.
2. La demanda de energía eléctrica en Yibuti es cada vez más grande, donde en el año 2012 creció casi 60% por encima de la demanda registrada en el año 2000 reflejando el desarrollo del país.
3. La mayor parte de la demande eléctrica se satisface mediante centrales hidroeléctricas desde la vecina Etíope, provocando una inseguridad energética ya que la Republica de Etiopía no garantiza una cantidad fija de producción eléctrica destinada a Yibuti.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III. Potencialidades técnicas de los sistemas de generación eólico para Yibuti.

3.1 Introducción al capítulo.

La importancia de la potencialidad de generación eléctrica mediante energía renovable depende mucho de las características geográficas y climáticas entre otras de los sitios seleccionados. Debido a ello, se caracterizará en este capítulo los sitios favorables así que sus potencialidades de generación eléctrica. Luego se realizará la selección de equipos eólicos para el dimensionamiento de los parques y su conexión al sistema eléctrico Nacional de Yibuti. Por último se dará a conocer la contribución energética que aportará el sistema eólico a la demanda eléctrica de la nación.

3.2 Determinación de los parámetros básicos del sistema de generación eólico en Yibuti.

La generación de energía eléctrica mediante un sistema eólico siempre conlleva unos análisis fundamentales a la hora de caracterizar los sitios seleccionados. Estos análisis son generalmente el estudio de la velocidad del viento, su frecuencia de distribución a lo largo de un cierto intervalo de tiempo (un año o más) y la producción de energía de estos sitios para satisfacer una necesidad energética determinada.

3.2.1 Medición de velocidad del viento.

Las velocidades de los vientos en cualquier lugar del mundo dependen mucho de las diferencias de presiones que se crean en su alrededor (ver epígrafe 1.4). El desarrollo de aprovechamiento de la Energía Eólica para generar electricidad se debe hacerse por medio de mapas eólicos para localizar los sitios potencialmente favorables. Luego se procede las instalaciones de torres meteorológica dotados de instrumentos adecuados como anemómetros, en la medición de velocidad, y veletas, para indicar su dirección.

En el año 2002, un proyecto de evolución de recursos eólicas empezó y se instaló 12 estaciones de medición con una altura de 40 metros al nivel del suelo.

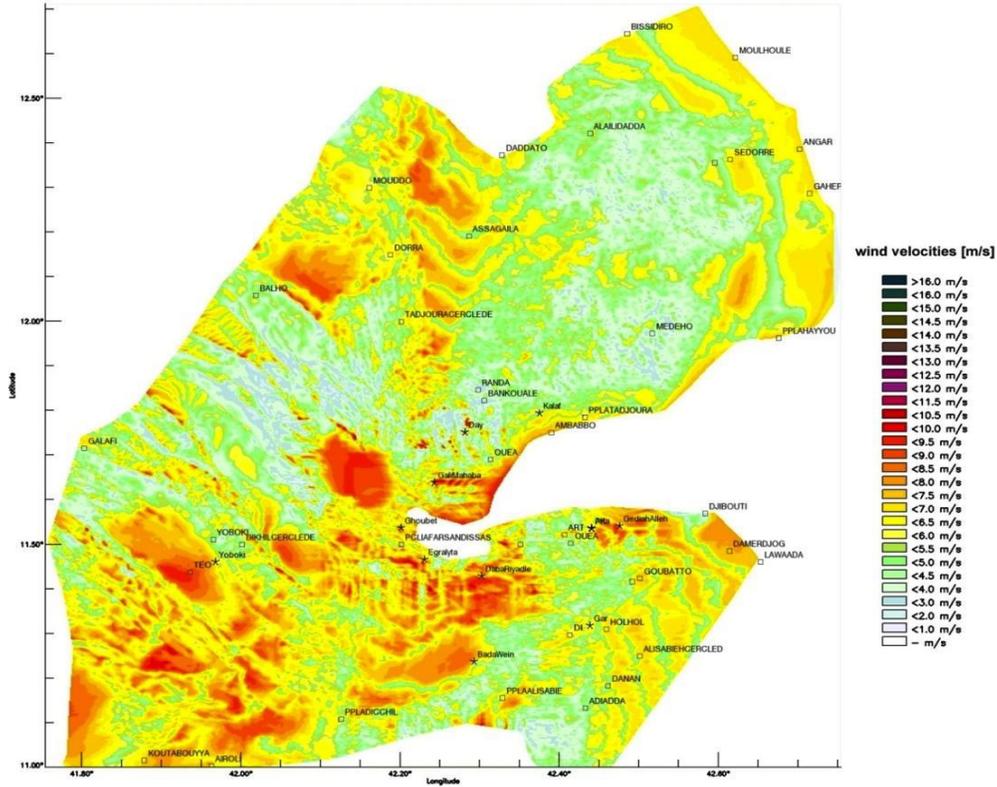


Fig.3.1. Mapa eólica de Yibuti a 60 m del suelo, 2006. (Fuente: CERD, 2004)

Tabla 3.1 Características de los sitios de instalación. (Fuente: CERD, 2004)

Nombre del sitio	Código	Altitud (m)	Posición Geográfica
Attar	01	31	38P 03045 UTM 126995
PK 23	02	185	39P 02773 UTM 127636
Grande Bara	03	583	38P 02435 UTM 124349
Ras Bir	04	68	38P 03159 UTM 132677
Ras Ali	05	49	39P 02748 UTM 130242
Ghoubet	06	230	38P 02261 UTM 126391
Gali Maaba	07	489	38 P 02137 UTM 128001
D. Reyleh	08	678	38P 02453 UTM 126409

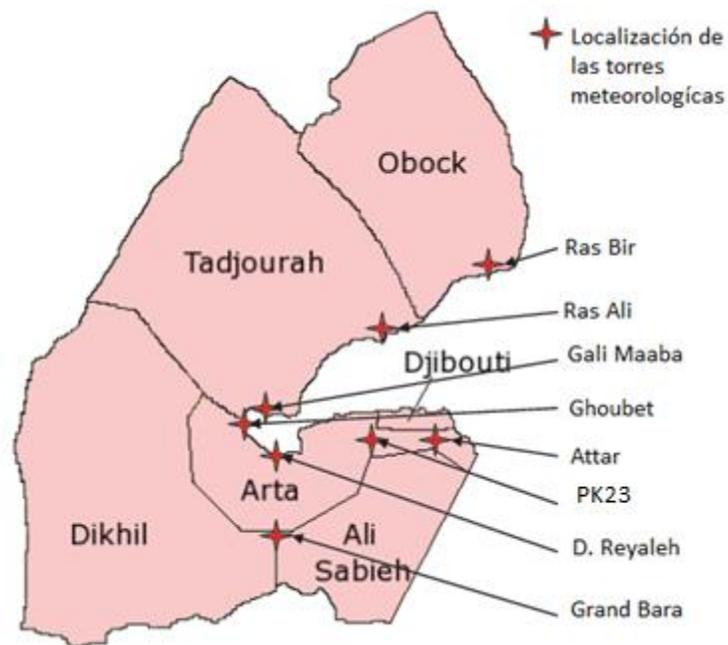


Fig.3.2. Localización geográfica de las torres meteorológica.

A partir de los datos recolectados, se clasifico los sitios, según sus velocidades medias, como sitios potencialmente favorables y menos favorables para la generación de energía eléctrica como se refleja en la tabla 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2 Velocidades medias mensuales (m/s) de los sitios potenciales. (Fuente: CERD, 2004)

Sitios	Media
Gali Maaba	9,1
Ghoubet	8,9
Grand Bara	6,6

Se puede observar que las regiones de Gali Maaba y Ghoubet tienen velocidades medias casi iguales a 9 m/s medidas desde una altura de 40 m mientras el sitio de Grand Bara posee una velocidad media superior a 6,5 m/s.



Fig.3.3. Selección de los sitios potencialmente favorables. (Fuente: Google Earth)

Tabla 3.3 Velocidades medias mensuales (m/s) de los sitios menos potenciales. (Fuente: CERD, 2004)

Sitios	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
Rayaleh	5,8	6,1	5,7	4,9	3,7	5,2	6,0	6,1	4,0	5,4	6,4	6,1	5,5
Ras Bir	4,4	4,6	4,1	4,0	5,7	9,1	6,4	4,9	5,6	4,8	4,3	4,2	5,2
Ras Ali	5,7	4,5	4,3	5,3	4,6	5,1	7,2	6,3	4,6	4,5	4,6	4,4	5,1
PK 23	4,7	4,3	3,9	3,7	3,3	4,8	7,3	6,7	4,1	4,3	4,2	4,5	4,7
Attar	4,7	4,4	3,9	3,8	3,4	5,1	6,4	5,2	3,8	3,9	4,0	4,5	4,4

Los sitios de la tabla 3.3 son menos favorables para la producción de energía eléctrica pero si tienen un potencial eólico que no se puede desperdiciar en el uso de sistemas de bombeos en las zonas rurales ya que el país tiene un gran problema de insuficiencia de agua potable en todas las regiones.

3.2.2 Tratamiento de los datos del viento.

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, es obvio que la única manera de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la dirección y velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución.

3.2.2.1. Distribución de direcciones de viento.

La **distribución de direcciones de viento** es de vital importancia a la hora de ubicar las turbinas eólicas en terrenos no uniformes o formando varios conjuntos de ellas, e incluso para conocer la variabilidad direccional del régimen de vientos al que debe responder el sistema de orientación de la máquina. Esta distribución se determina mediante un diagrama denominado rosa de vientos.

➤ Rosa de vientos.

La **rosa de los vientos** es un sistema de un diagrama polar que representa el tanto por ciento de viento con la dirección indicada y, en módulo, su escala de velocidad media. La rosa de las frecuencias normalizada se obtiene a partir de las frecuencias de ocurrencia observadas en intervalos de dirección y velocidad dados.

Lo más habitual es dividir los 360° en 16 sectores:

-N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSO, SO, OSO, O, NO, NNO

-Cada sector corresponde a 22.5°; correspondiendo el N desde 348.75° a 11.25°, el NNE desde 11.25° a 33.75°, etc.

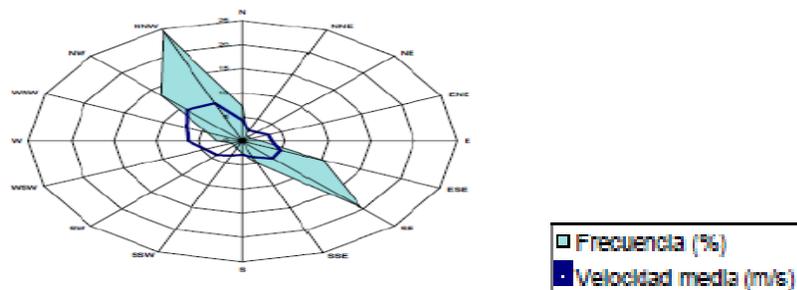


Fig.3.4. Diagrama de rosa de vientos.

➤ Rosa de rugosidad.

La rosa de las rugosidades sirve para describir la rugosidad del terreno en diferentes direcciones desde el futuro emplazamiento de una turbina eólica. Las divisiones en las que se divide la rosa de las rugosidades deberán ser las mismas que la rosa de los vientos. La rugosidad no caerá en una clase de las rugosidades sino que se hallará una rugosidad media. Es preocupante sobretodo la rugosidad media de las direcciones de viento predominante.

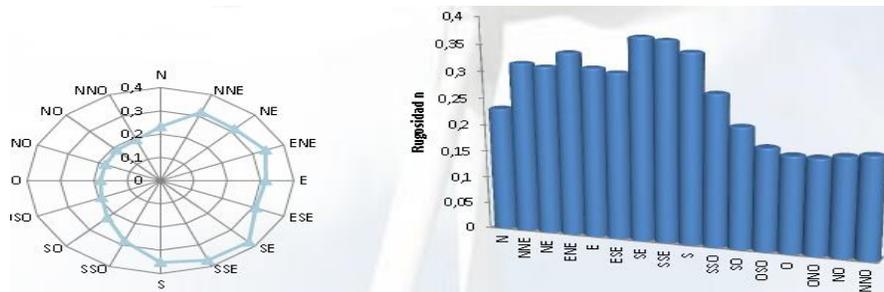


Fig.3.5. Diagrama de rosa de rugosidades.

3.2.2.2. Distribución de la velocidad del viento.

Si se toma la velocidad promedio anual del viento para el cálculo de la densidad de potencia promedio anual se subestimaría su valor, pues existe una relación cúbica entre la potencia y la velocidad, es decir, el promedio de varias velocidades elevadas al cubo es siempre mayor que el cubo de la velocidad promedio.

El conocimiento de la **ley distribución de probabilidades de velocidades de viento** (función densidad de probabilidad, $p(v)$), es muy importante a la hora de determinar la densidad de potencia eólico disponible, además de para otros parámetros energéticos de interés. Una de las distribuciones más utilizadas con estos fines es la Rayleigh, aunque algunos meteorólogos prefieren utilizar la distribución Weibull que es más general y más precisa, y en muchos casos se ajusta más a un mayor número de localizaciones.

➤ **Distribución Weibull.**

Normalmente se suele utilizar la distribución de Weibull, honor al ingeniero y matemático sueco Ernst Hjalmar Waloddi Weibull, se trata de una distribución de dos parámetros, uno de escala c y otro llamado factor de distribución de forma k donde en la figura 3.6 se muestra una distribución típica de Weibull.

Se expresa por medio de la expresión (Díez, Energías Alternativas, 2003):

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left[\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]} \quad (Ec 3.1)$$

Siendo

$p(v)$: función densidad de probabilidad;

c : factor de escala, m/s;

k : factor de forma, que caracteriza la disimetría de la distribución, adimensional;

v : velocidad del viento, m/s.



Fig.3.6. Distribución típica de Weibull.

La distribución de Weibull, permite la evaluación de varias propiedades importantes de las características del viento en función de los parámetros c y k , a partir de las siguientes expresiones:

- Probabilidad de que existan velocidades de viento inferiores a una determinada V_x , (frecuencia acumulada) (Hernández):

$$p(V < V_x) = \int_0^{V_x} p(V) dV = 1 - e^{-\left[\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right]} \quad (Ec 3.2)$$

- Probabilidad de que existan velocidades de viento entre dos límites de interés V_x y V_y (Hernández):

$$p(V_x < V < V_y) = \int_{V_x}^{V_y} p(V) dV = e^{-\left[\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right]} - e^{-\left[\left(\frac{V_y}{c}\right)^k\right]} \quad (Ec 3.3)$$

Para determinar los parámetros c de escala y k de forma de la distribución, se puede utilizar una aproximación de mínimos cuadrados, partiendo de la función de distribución de Weibull en la forma (Díez, Energías Alternativas, 2003):

$$1 - F(v) = e^{-\left[\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]} \quad (Ec 3.4)$$

y tomando logaritmos dos veces se puede poner en la forma:

$$-\ln\{1 - F(v)\} = \left(\frac{v}{c}\right)^k \Rightarrow \ln[-\ln\{1 - F(v)\}] = \ln\left(\frac{v}{c}\right)^k = k \ln v - k \ln c$$

$$y = kx + b, \text{ con: } \begin{cases} y = \ln[-\ln\{1 - F(v)\}] \\ x = \ln v; \quad b = -k \ln c; \quad c = e^{-\frac{b}{k}} \end{cases}$$

Para n pares de valores (x, y) mediante mínimos cuadrados se obtienen los valores de k y b :

$$k = \frac{\sum_{n=1}^n (x * y) - \frac{\sum_{n=1}^n x * \sum_{n=1}^n y}{n}}{\sum_{n=1}^n x^2 - \frac{(\sum_{n=1}^n x)^2}{n}}; \quad b = y - kx = \frac{\sum_{n=1}^n y}{n} - \frac{k \sum_{n=1}^n y}{n} \quad (Ec 3.5)$$

$$c = e^{-\frac{b}{k}} = \exp \left\{ - \left(\frac{\sum_{n=1}^n y}{n} - \frac{k \sum_{n=1}^n y}{n} \right) \frac{\sum_{n=1}^n x^2 - \frac{(\sum_{n=1}^n x)^2}{n}}{\sum_{n=1}^n (x * y) - \frac{\sum_{n=1}^n x * \sum_{n=1}^n y}{n}} \right\} \quad (Ec 3.6)$$

➤ **Distribución Rayleigh.**

Con los datos disponibles de la velocidad del viento en un determinado lugar, se puede encontrar la ecuación de distribución de Rayleigh que describe la distribución de velocidades del viento con una aproximación razonable dentro de ciertos límites, siendo la velocidad media del mismo un parámetro a tener en cuenta.

Para velocidades del viento por debajo de 15 km/hora, la distribución de Rayleigh tiene poca precisión, no siendo útil su aplicación en lugares con una velocidad media del viento inferior a 13 km/hora (Díez, Energías Alternativas, 2003). El área bajo cualquier curva siempre vale la unidad, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100%. La mitad del área está a la izquierda de la vertical que pasa por el máximo, y el valor correspondiente es la mediana de la distribución, que significa que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de ese valor y la otra mitad soplará a más de ese valor. La velocidad del viento media es el promedio de las observaciones de la velocidad del viento que tendremos en ese emplazamiento; se observa que esta distribución de las velocidades del viento no es simétrica. A veces las velocidades del viento serán muy altas, aunque muy raras, siendo las velocidades del viento más comunes las correspondientes al valor medio, que se conoce como valor modal de la distribución.

La distribución de Rayleigh es de la forma (Díez, Energías Alternativas, 2003):

$$p(v) = \frac{\pi * v}{2 * \bar{v}^2} \exp - \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right] \quad (Ec 3.7)$$

Siendo

v : Velocidad instantánea del viento, m / s.

\bar{v} : Velocidad promedio anual en el sitio, m /s.

3.2.3 Energía anual generada de un aerogenerador.

Los fabricantes de turbinas eólicas ofrecen en la ficha técnica de la máquina, la curva de potencia real del equipo en función de la velocidad instantánea del viento, a través de la cual se puede determinar la energía anual posible a generar.

$$E_{anual} = 8\,760 * \sum_{i=1}^m p(v)_i * P_i \quad , kWh/año \quad (Ec\ 3.8)$$

Donde :

P_i : Potencia correspondiente a la velocidad instantánea del viento (de la curva de potencia), kW.

$p(v)_i$: Frecuencia relativa de ocurrencia de la velocidad instantánea (de la distribución de velocidades).

Se seleccionó en la literatura un aerogenerador GAMESA (ver anexo 2) de eje horizontal con la características técnicas adecuadas como se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Características técnicas del aerogenerador G80-2.0 MW.

Diámetro del Rotor (m)	80
Área Barrido (m ²)	5 027
Numero de Palas	3
Altura de la Torre (m)	60
Tipo de Torre	Tubular
Ratio de la Multiplicadora	1/100,5 (50 Hz); 1/120,5 (60 Hz)
Tipo de Generador	Generador doblemente alimentado
Potencia nominal de Generador (MW)	2
Tensión del Generador	690 V AC

A continuación se muestra la curva potencia del aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW para las distintas velocidades de viento que puede existir en los sitios seleccionados.

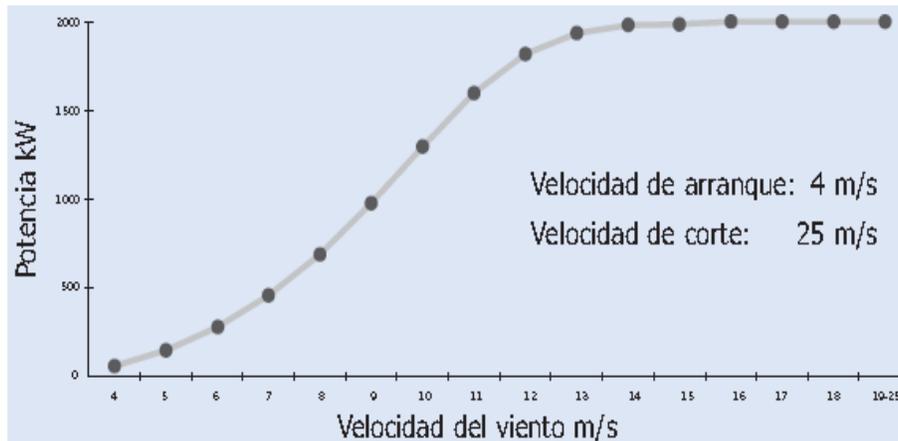


Fig.3.7. Curva de Potencia Gamesa G80-2.0 MW. (Fuente: Gamesa eólica)

Debido a la insuficiencia de los datos de las mediciones del viento, se determinó la potencia disponible partir de la función de distribución de Rayleigh.

La velocidades del viento fueron medidos a una altura de 40 m al suelo. Usando la ecuación 3.9, se determinó las velocidades del viento a una altura 60 m al suelo para las regiones de Grande Bara, Ghoubet y Gali Maaba.

$$V_{(h)} = V_o * (h/h_o)^\alpha \tag{Ec 3.9}$$

Donde:

V(h): Velocidad del viento que se desea estimar (m/s), a la altura h del suelo

V_o: Velocidad del viento (m/s) conocida a una altura h_o

h: Altura (m) a la que se quiere estimar la velocidad del viento

h_o: Altura (m) de referencia

α: Valor que depende de la rugosidad existente en el emplazamiento (ver tabla 3.5)

Tabla 3.5 Coeficiente de variación (α) (Awaleh, 2007).

Sitos	Grande Bara	Ghoubet	Gali Maaba
α	0,177	0,044	0,256

Tabla 3.6 Velocidad del viento a 60 m del suelo.

Sitos	Grande Bara	Ghoubet	Gali Maaba
V(h)	7,1	9,56	9,77

En la tabla 3.8 se presentan las potencias del aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW y la disponible en las regiones seleccionadas para las instalaciones de los parques eólicos. En esta tabla, se brindó los resultados finales para mejorar la visualización de los datos. Se puede consultar el anexo 3 para más detalles. La potencia disponible se determina a partir de la potencia del aerogenerador multiplicada por la probabilidad de que se produzca la velocidad de dicha potencia.

Tabla 3.7 Potencia generada del aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW para la regiones de Grande Bara, Ghoubet y Gali Maaba.

Sitos	Grande Bara	Ghoubet	Gali Maaba
Potencia aerogenerador (kW)	33 262,3	33 262,3	33 262,3
Potencia disponible (kW)	565,22	937	964,12

Tabla 3.8 Energía anual producida por el aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW.

Sitos	Grande Bara	Ghoubet	Gali Maaba
Energía anual (MWh)	4 951,32	8 208,12	8 445,7

3.2.4 Factor de capacidad de las plantas eólicas.

El **factor de planta** (también llamado *factor de capacidad* neto o *factor de carga*) de una central eléctrica es el cociente entre la energía real generada por la central eléctrica durante un período (generalmente de forma anual) y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período, conforme valores nominales placa de identificación de los equipos. Es una indicación de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo.

Los factores de planta o factores de capacidad varían considerablemente dependiendo del tipo de combustible que se utilice y del diseño de la planta. El factor de planta no se debe confundir con el factor de disponibilidad o con eficiencia.

Del mismo modo, el factor de capacidad en las plantas eólicas se define como la relación entre la energía generada (E) por un aerogenerador, o parque eólico, durante un período dado y la que se hubiera producido si durante ese período hubiese estado funcionando continuamente a potencia nominal (Pn).

En general, el factor de capacidad se calcula para un período de un año (8 760 horas), aunque puede ser calculado para cualquier otro período.

Teniendo en cuenta la anterior definición, el factor de capacidad se expresa por la relación siguiente (Figuro, 2011):

$$FC = \frac{E}{P_n \times 8760} \quad (Ec\ 3.10)$$

El factor de capacidad es adimensional, por lo que si se multiplica por 100 se puede dar en %. El valor del FC debe ser mayor que 20% para que un sistema de generación de electricidad, ya sea un aerogenerador o una agrupación de aerogeneradores (parque eólico), se considere de forma preliminar factible económicamente. Este valor de 20% lo indica la experiencia de muchas aplicaciones. Es decir, en los cálculos iniciales de un proyecto eólico se estima la energía que genera el aerogenerador o el parque eólico, e inmediatamente se pasa a calcular el factor de capacidad. Si éste resulta menor que 0,2, no es aconsejable continuar el desarrollo del proyecto.

En la práctica, el factor de planta nunca es 100%. Se ve disminuido por:

- Las operaciones de mantenimiento, los fallos más o menos largos de equipamientos, etc.
- La ausencia de demanda de electricidad que obliga a los administradores de red a disminuir o parar la producción en algunas unidades.
- La intermitencia o irregularidad de la fuente de energía como es, por ejemplo, el caso de la energía solar o la energía eólica, respectivamente.
- Las pérdidas debidas a equipos eléctricos como inversores AC/DC, líneas de transmisión internas, etc. Otras pérdidas debidas por ejemplo a sombras en el caso de energía solar.

Los factores de planta difieren según los tipos de instalaciones donde los valores típicos de los mismos son (Wikipedia, 2014):

- Parque eólico: 20-40%.
- Panel fotovoltaico: 10-15%.
- Central hidroeléctrica: 60%.
- Central nuclear: 60%-98%.
- Central termoeléctrica a carbón: 70-90%.
- Central de ciclo combinado: 60%

Para la turbina eólica Gamesa G80 de 2.0 MW de potencia nominal, entendiéndose como potencia nominal aquella para la que fue diseñada la turbina, la cual se alcanza en los grandes aerogeneradores para velocidades de viento entre 12 y 15 m/s (de 43,2 a 54 km/h), el factor de capacidad que se obtiene con esta turbina para los sitios seleccionados se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Factor de capacidad.

Sitos	Grande Bara	Ghoubet	Gali Maaba
FC en horas equivalente (h)	2475,66	4104,06	4222,85
FC en %	28,26	46,85	48,2

3.2.5 Diseño del parque eólico.

Para determinar la configuración de un parque eólico, es decir, la distribución de los aerogeneradores sobre el terreno, se debe tener en cuenta tanto los aspectos puramente del viento, como velocidades medias, direcciones predominantes, ráfagas y vientos extremos, así como aspectos del terreno disponible: la disposición característica de las máquinas y la distancia entre ellas, además de las características de los propios aerogeneradores como el tamaño, el tipo y la altura de las torres.

3.2.5.1 Emplazamiento de los aerogeneradores.

El emplazamiento de los aerogeneradores, tras un estudio de los vientos, es inmediato. La colocación debe ser en filas perpendiculares a las direcciones predominantes, a partir de las rosas de vientos, de forma que el aprovechamiento sea máximo. El espacio entre filas será de un mínimo necesario para evitar casos de posibles turbulencias y que el viento entre limpio y con la potencia máxima disponible en el siguiente molino.

- Emplazamiento de los aerogeneradores sobre terreno llano.

Cuando el terreno es llano y hay una dirección de viento dominante bien definida, los aerogeneradores se suelen disponer en filas alineada (Figuro, 2011) s.

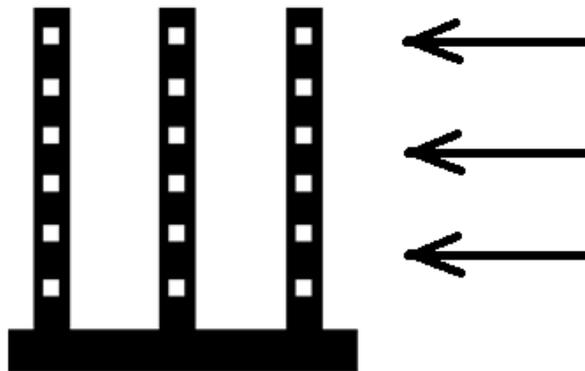


Fig.3.8. Configuración del parque eólico en filas alineadas. (Fuente: (Figuro, 2011))

Cuando el terreno es llano pero el viento presenta frecuentes cambios de dirección, los aerogeneradores se suelen disponer al tresbolillo. Así se denomina cuando un grupo de objetos se dispone en filas paralelas, de modo que los de cada fila correspondan al medio de los de la fila inmediata (Figuro, 2011).

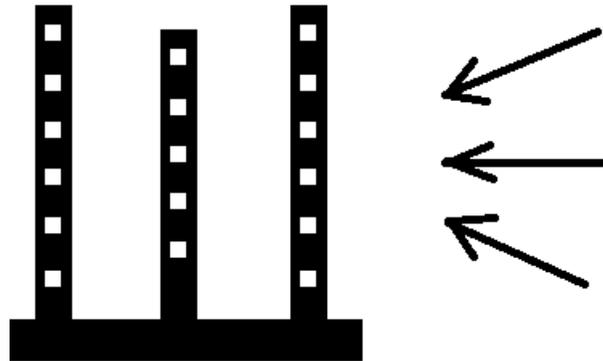


Fig.3.9. Configuración del parque eólico al tresbolillo. (Fuente: (Figuro, 2011))

- Emplazamiento de los aerogeneradores sobre colinas.

Cuando el terreno de emplazamiento de los aerogeneradores es sobre terreno que presentan colinas, se preocupara más bien los caminos o accesos hasta las plataformas. En la figura 3.10 se muestra la configuración típica de parques eólicos sobre terrenos que presentan colinas.

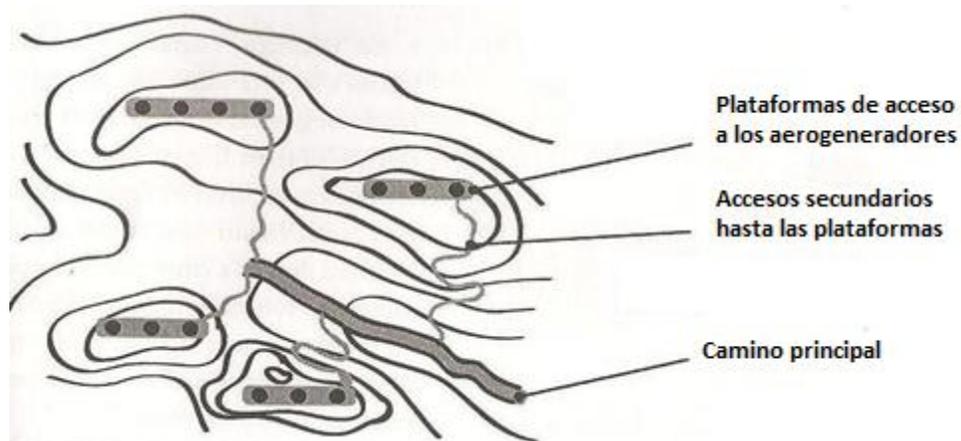


Fig.3.10. Configuración de un parque sobre colinas no alineadas. (Fuente: (Figuro, 2011))

Como se puede observar, existe un espaciado o distancia de un aerogenerador a otro, tanto de frente al viento o transversal, como en la dirección del viento. Estos espaciamientos configuran la geometría del parque y determinan las pérdidas aerodinámicas o pérdidas por su configuración. En estas pérdidas influye lo que se denomina la sombra que un aerogenerador provoca sobre el aerogenerador que le sigue, por lo que debe mantener una distancia mínima entre uno y otro. Esto lo provoca lo que se conoce como estela aerodinámica.

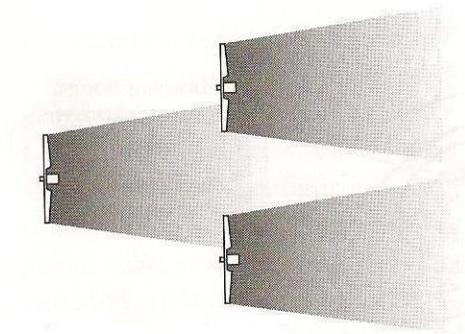


Fig.3.11. LA distribución de los aerogeneradores en un parque eólico influye en su rendimiento energético. (Fuente: (Figuro, 2011))

En resumen, cuando existe un viento con una dirección predominante en general se recomienda una distribución en filas alineadas, con separación transversal (perpendicular a la del viento dominante) entre turbinas de tres a cinco veces el diámetros del rotor. En la dirección del viento predominante la separación entre turbinas es de cinco a nueve veces el diámetro del rotor.

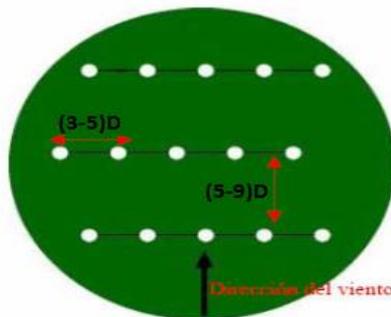


Fig.3.12. Configuración del parque eólico. (Fuente: Elaboración propia)

3.2.5.2 Calculo de la producción de energía de los parques eólicos.

Una vez hallada la energía anual producida por el aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW, se determinara la energía anual total generada por los parques eólicos. Esta se halla multiplicando la energía anual de un solo aerogenerador por la cantidad de aerogeneradores posible a instalar. Para una primera fase, se instalará 40 aerogeneradores distribuidos en 20 aerogeneradores en Grande Bara, 10 aerogeneradores en Ghoubet y 10 aerogeneradores en Gali Maaba.

Tabla 3.10 Energía anual producida por el parque eólico.

Sitos	Grande Bara	Ghoubet	Gali Maaba
Energía anual del aerogenerador (MWh)	4 951,32	8 208,12	8 445,7
Energía anual de los parques eólicos (MWh)	99 026,4	82 081,2	84 457

La energía total a inyectar a la red por los parques eólicos es de 265 564,6 MWh al año. Lo que se acaba de obtener es la energía teórica de los parques. Ahora para conseguir la energía real, se debe aplicarla unos factores de corrección: pérdidas por indisponibilidad de máquinas y subestación = 0,98; pérdidas por transporte = 0,97; pérdidas por mantenimiento = 0,97 (Benítez, 2009).

Las pérdidas por indisponibilidad de máquinas y subestación contemplan las posibles averías que sufrirán los aerogeneradores y que impedirán su funcionamiento durante el tiempo que dure la avería y la reparación así como los tiempos que deben permanecer inactivos mientras se realiza en ellos labores de mantenimiento. $P_i=0,98$.

Las pérdidas por transmisión: Son las pérdidas que se producen en la línea de evacuación del parque (desde el parque a la subestación) y dentro del propio parque en el tendido de media tensión a 20 kV. Estas pérdidas son básicamente debidas al calor (efecto Joule) por la intensidad que circula por los conductores. $P_t=0,97$

Las pérdidas por mantenimiento contemplan todos los momentos en los que el conjunto no puede estar trabajando debido a una parada para el mantenimiento de cualquiera de sus elementos componentes. Ya sea un mantenimiento preventivo como un mantenimiento estipulado a partir de una serie de horas de trabajo. $P_m=0,97$

$$\text{Energía final de los parques}_{real}(\text{año}) = \text{Energía}_{Teórica} * P_i * P_t * P_m \quad (\text{Ec 3.10})$$

$$\text{Energía final de los parques}_{real}(\text{año}) = 265\,564,6 * 0,98 * 0,97 * 0,97$$

$$\text{Energía final de los parques}_{real}(\text{año}) = 244\,872,33 \text{ MWh}$$

La producción real de energía anual de los parques eólicos, es de 244 872,33 MWh.

3.2.6 La conexión eléctrica de los parques eólicos con la red eléctrica del país.

Los servicios de generación, transmisión y distribución de electricidad, así como otros servicios asociados, son responsabilidad de la empresa eléctrica de Yibutí (EDD) y de sus organizaciones de base distribuidas en todo el país.

Los parques eólicos están ubicados en los sitios potencialmente favorables en el territorio nacional. Estos sitios son Grand Bara, Ghoubet y Gali Maaba y están alejados de la civilización por lo que es necesario realizar un proyecto de interconexión entre estos parques y la red eléctrica para el transporte de la energía eléctrica.

Los sitios de Ghoubet y Gali Maaba tienen una ubicación geográfica cercana uno del otro, sus conexiones eléctricas a la red pueden realizarse de dos posibles maneras hasta el punto común de conexionado.

- ✓ Diseñar una sola red eléctrica de transporte común para los dos parques eólicos de 51 km de largo con una subestación de 690 V AC/63 kV AC o 690 V AC/ 230 kV AC con una potencia de 40 MW.



Fig.3.13. Conexión eléctrica de los dos parques eólicos a la red. Variante1. (Fuente: Google Earth)

Diseñar una red eléctrica de transporte independiente para cada parque. La distancia de la red eléctrica del parque de Gali Maaba sería de 31 km, la del parque de Ghoubet tendría 35 km hasta el punto de conexión a la red eléctrica del país. La subestación sería de 690 V AC/63 kV AC o 690 V AC/ 230 kV AC con una potencia de 20 MW para cada parque.



Fig.3.14. Conexión eléctrica de los dos parques eólicos a la red. Variante 2. (Fuente: Google Earth)

El parque eólico de Grand Bara tiene una capacidad de 40 MW de potencia con 20 aerogeneradores Gamesa G80-2.0 MW. El parque está ubicado a 18 km de su punto de conexión con la línea eléctrica de 230 kV, la subestación sería de 690 V AC/63 kV AC o 690 V AC/ 230 kV AC.

A continuación se muestra la ubicación de los tres parques eólicos con su conexión a la red eléctrica de 230 kV que viene de Etiopía hasta la capital de Yibutí.

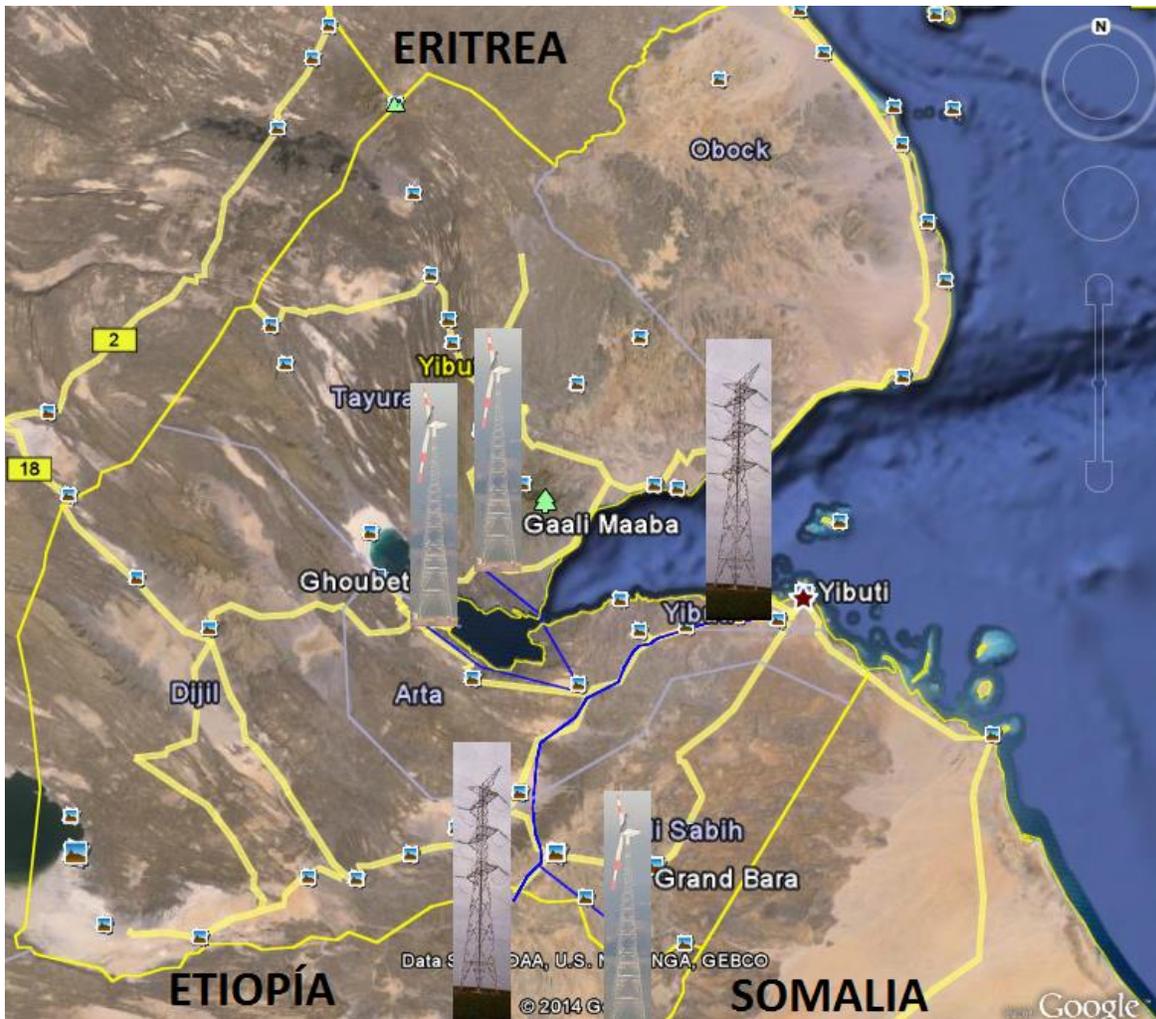


Fig.3.15. Conexión eléctrica de los tres parques eólicos a la red del país. (Fuente: Google Earth)

3.2 La contribución energética de los parques eólicos a la demanda eléctrica de la nación.

Como se había señalado con anterioridad, la casi totalidad de la demanda eléctrica de la nación se satisface con las interconexiones de las redes entre Yibutí y Etiopia. Nuestro objetivo principal es reducir la dependencia energética fuera de territorio nacional. Al aprovechar nuestro potencial energético con fuente renovable, se evitaría cualquier crisis energética futura y así alcanzar una seguridad energética en el país.

La producción energía anual posible a inyectar a la red eléctrica del país mediante los parques eólicos de Grande Bara, Ghoubet y Gali Maaba es de 244 872,33 MWh.

La demanda energética en la ciudad de Yibutí se satisface mediante centrales electrógenos e hidroeléctricos mediante la interconexión con la vecina Etiopia. En el año 2012, la tasa de participación en la producción energética estaba formada por 3 centrales como se muestra en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Tasa de participación energética. (Fuente: EDD)

Centrales	Boulaos	Marabout2	EEPCO
Energía producida en MWh/año	31 638	1 358	362 954

En la figura 3.16 se muestra la tasa de participación energética en la producción total de energía eléctrica de la ciudad de Yibutí. Luego en la figura 3.17 se muestra las aportaciones energética de los sistemas de producción eléctrica mediante fuentes de energías renovables. En esta se pone en evidencia el nivel de aprovechamiento que se puede alcanzar de las energías renovables y con ello la independencia energética del país.

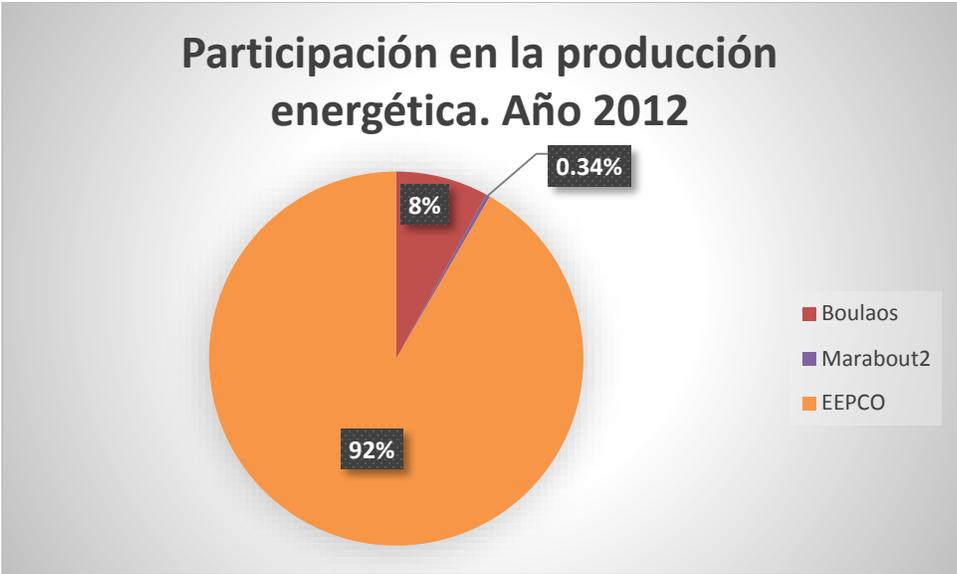


Fig.3.16 Tasa de participación energética actual en Yibuti. (Fuente: Elaboración propia)

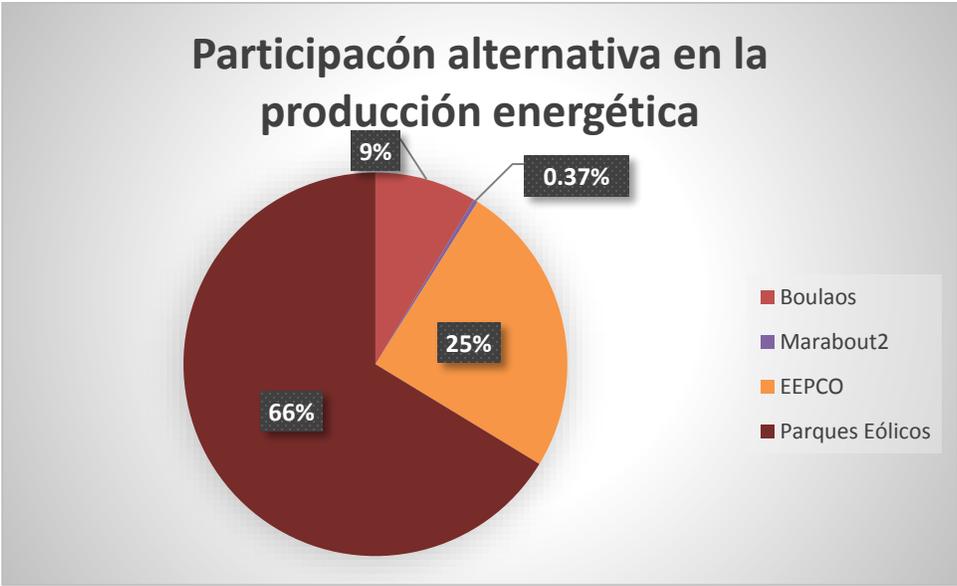


Fig.3.17 Tasa alternativa de participación energética para Yibuti. (Fuente: Elaboración propia)

❖ Conclusiones Parciales

1. La Republica de Yibuti tiene regiones potencialmente favorables para el desarrollo de la energía eólica. A nivel mundial se considera técnicamente viable las instalaciones de granjas eólicas a sitios con una velocidad media mayor a 4 m/s. Las regiones de Ghoubet y Gali Maaba tienen una velocidad media de 9 m/s lo que explica el entusiasmo del gobierno de Yibuti para la energía eólica.
2. Se demostró que las regiones seleccionados para las instalaciones de parques eólicos tienen un factor de planta promedio de 41,10% por encima de los valores típicos en el mundo de los parques eólicos que oscilan entre en 20 a 40%.
3. La producción futura de energía eléctrica anual mediante los parques eólicos de 40 aerogeneradores Gamesa G80-2.0 MW se estiman en unos 244 872,33 MWh.
4. Se propuso una participación alternativa con una tasa de 66% en la producción de energía eléctrica mediante el uso de energía eólica que garantiza una mayor independencia energética.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV: Estudio Económico

4.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se analizará el aspecto económico del uso de la energía eólica en la producción de energía eléctrica. Los costos de los parques eólicos conectados a la red dependen de muchos factores como los tipos de parques eólicos, las turbinas, los niveles de velocidades entre otros. El análisis de la factibilidad económica de los proyectos de energización eléctrica a partir de fuentes renovables de energía nos permite dar respuestas a algunas de las problemáticas que frenan el uso de estas fuentes de energía. Este análisis nos dará también una idea sobre la protección ambiental que llevan en sí las fuentes renovables de energía.

4.2 Costo de las instalaciones eólicas

Como se conoce, los parques eólicos pueden ser instalados en tierra (terrestres u onshore), o en el mar (marítimo, fuera de costa u offshore). La mayor parte de la capacidad instalada en parques eólicos es dominada por los parques eólicos terrestres u onshore. No obstante, el mercado de los parques marítimos está creciendo con rapidez. Dado que en este trabajo se estudió zonas terrestres en Yibuti, el trabajo se dedicará solo a los primeros.

4.2.1 Costos de inversión.

El análisis económico de la energía eólica debe tener en cuenta varios aspectos básicos:

- Los costos de inversión
- Los costos anuales de explotación, es decir, operación y mantenimiento
- Los costos anuales de financiamiento

Los costos de inversión más importantes en el proyecto de un parque eólico terrestre y su participación en el costo total, se presentan seguidamente (Figuro, 2011):

- Costos de estudios de viabilidad: 2%. Incluyen el estudio del recurso eólico, análisis del emplazamiento, diseño inicial, estudio de impacto ambiental, estudio de rentabilidad y gestión de proyecto, entre otros gastos iniciales.

- Costos del aerogenerador: 65-84%. Incluyen los de producción de la turbina y equipos auxiliares, y la transportación hasta el sitio de emplazamiento e instalación.
- Costos de obra civil: 4-16%. Incluyen la transportación interna dentro del emplazamiento de la turbina y la torre, la construcción de la cimentación y carreteras, y otros costos relacionados con la infraestructura necesaria para la instalación y puesta en marcha de las turbinas.
- Costos de conexión a la red: 9-14%. Incluyen el cableado, las subestaciones y las líneas eléctricas necesarias.
- Otros costos de inversión: 4-10%. Por ejemplo, costos financieros durante la construcción, ingeniería, permisos legales y de uso del terreno, licencias, consultas, seguros y, además, los sistemas de monitoreo.

4.2.1.1 Costos unitarios de un parque eólico

¿Cuánto cuesta la instalación de un kW en un parque eólico? La turbina constituye el elemento más costoso de los parques eólicos. Como se señaló anteriormente, su costo oscila entre 64 y 85%. Ello depende, entre otros factores, de la madurez de la industria eólica en el país productor de la turbina y de las especificidades del proyecto, ya que mientras más resistentes sean las turbinas solicitadas, más costosas son. Los componentes más caros son la torre, las palas y la caja multiplicadora, los cuales alcanzan alrededor de la mitad del costo total de la turbina (con valores aproximados de 26, 22 y 12%, respectivamente). El generador, transformador y convertidor llegan a 13% del costo del aerogenerador (Figuro, 2011).

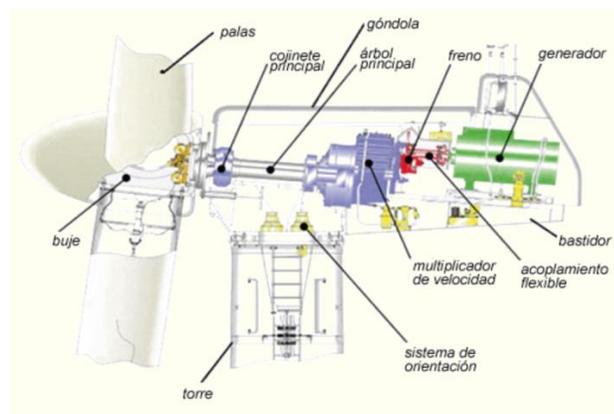


Fig.4.1. Turbina eólica y sus componentes.

Para que se tenga una idea de cómo los precios dependen de estos factores, veamos los precios en US\$/kW de las turbinas eólicas en tres países de diferentes continentes, y con diversos grados de desarrollo (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Precios de las turbinas eólicas en tres países (US\$/kW). (Fuente: (Figuro, 2011))

País	2006	2007	2008	2009	2010
China	885	928	911	864	644
Italia	1 290	1 874	1 892	1 798	1 592
EE.UU	1 183	1 224	1 456	1 339	1 234

Los costos de conexión a la red dependen, entre otros factores, de si el parque va a ser conectado a una red de transmisión, o de distribución. En el primer caso, los costos se incrementan debido a la tecnología de la transformación. Si la red eléctrica no está muy alejada del parque eólico, la conexión usual es la de corriente alterna de alta tensión. Si las distancias son mayores de 50 km, se estima que emplear corriente directa de alto voltaje es la solución más económica. Los costos de conexión a la red varían de un país a otro. En los parques eólicos terrestres los costos se mueven entre 11 y 14% del costo total de inversión.

Los costos de las obras civiles y la construcción incluyen la transportación y la instalación de la turbina y la torre, además de la construcción de la cimentación y los caminos de acceso, y otros costos relacionados con la infraestructura del parque eólico. A pesar del aumento del tamaño de los aerogeneradores, y su correspondiente encarecimiento, los costos de transportación e instalación no han crecido en la misma proporción. La construcción de medios de transporte e izaje diseñados específicamente para instalar aerogeneradores, ha reducido los tiempos y costos de instalación.

4.2.1.2 Costo de la potencia instalada

El costo de la potencia instalada en los últimos años se encuentra, mayoritariamente, en el rango de 1 700 y 1 250 US\$/kW para parques eólicos terrestres en países desarrollados. En el 2010, los costos de instalación en China se encontraban entre los más bajos del mundo, junto con Dinamarca, entre 1 300 y 1 384 US\$/kW. En los Estados Unidos, estos costos alcanzaron los 2 154 US\$/kW, y en Japón rebasaron los 3 000 US\$/kW (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Costo de la potencia instalada en el 2010 en varios países. (Fuente: (Figuro, 2011))

País	Costo, US\$/kW
China	1 287-1 354
Dinamarca	1 367
Italia	2 339
EE.UU	2 154

Los costos de la potencia instalada varían en dependencia del país y el proyecto, según los costos de las turbinas, de las condiciones del sitio de instalación, del grado de madurez de la industria eólica local y del desarrollo de la economía del país donde está siendo ejecutado, en lo cual influye la mano de obra y el grado de satisfacción de las necesidades tecnológicas requeridas (por ejemplo, poseer las grúas y los medios de transporte requeridos), entre otros.

En resumen, un parque de 80 MW instalado en China o en Dinamarca pudiera costar unos 104 000 000 US\$ y en los Estados Unidos, más de 172 000 000 US\$ (Tabla 4.3). ¿Cuánto costará en Yibuti? No olvide considerar que las turbinas eólicas pueden provenir de Europa o de Asia, dígase China, y los costos de flete marítimo encarecen grandemente el proceso inversionista, pudiendo representar hasta 20% de la inversión.

Tabla 4.3 Costo de la potencia instalada de un parque de 80 MW en varios países. . (Fuente: (Figuro, 2011))

País	Costo en US\$
China	102 960 000-108 320 000
Dinamarca	109 360 000
Italia	187 120 000
EE.UU	172 320 000

4.2.1.3 Costo de los parques eólicos a instalar en Yibuti.

Como se señaló anteriormente, el costo de la potencia instalada depende básicamente del lugar (país) en que se instala el parque eólico. Para los países del tercer mundo que no posean todavía las tecnologías necesarias para el diseño e instalación de los parques eólicos, se hace necesaria la selección adecuada del proveedor en dependencia del costo de la potencia instalada que ofrece dicho proveedor.

A partir de la tabla 4.2, se determinó el costo promedio de una potencia instalada para estimar el costo total de los parques eólicos que se pretende instalar en Yibuti. El costo promedio de una potencia instalada resulta entonces:

$$C_{P,I} = 1\,795 \text{ USD/kW}$$

Debido a que para una primera fase se quiere instalar 40 turbinas eólicas tipo Gamesa G80-2.0 MW, la potencia total a instalar viene siendo 80 MW. El precio de la inversión inicial para los 3 parques eólicos es entonces:

Tabla 4.4 Presupuesto total de la inversión de los parques eólicos.

Sitos	Grande Bara	Ghoubet	Gali Maaba
Potencia a instalar	40	20	20
Precios (US\$)	71 800 000	35 900 000	35 900 000

El presupuesto total del proyecto eólico asciende 143 600 000 US\$. En la tabla 4.5 se presenta la manera en que se reparte esta inversión.

Tabla 4.5 Presupuesto por conceptos de la inversión de los parques eólicos.

Conceptos	Precios en US\$
Aerogeneradores	103 392 000
Obra civil	15 796 000
Costo de conexión a la red	12 924 000
Estudio de viabilidad	1 436 000
Otros costos de inversión	10 052 000

4.2.1.4 Costes de operación y mantenimiento de aerogeneradores

Los modernos aerogeneradores se diseñan para operar unas 120 000 horas durante toda su vida, es decir, alrededor de 20 años. Evidentemente, esta duración es mucho mayor que la de un automóvil, cuya vida útil puede rondar las 6 000 horas. La experiencia demuestra que los costes de mantenimiento son relativamente bajos cuando el aerogenerador es nuevo, pero que se incrementan conforme la aeroturbina envejece. Por otro lado, los recientes estudios demuestran que los nuevos desarrollos tecnológicos requieren menores costes en mantenimiento que las aeroturbinas diseñadas en la década pasada. El estudio desarrollado en Dinamarca nos muestra que las aeroturbinas antiguas, de entre 25 y 150 kW tienen costes de mantenimiento anuales medios del 3 % de la inversión original. Las nuevas aeroturbinas, sustancialmente mayores, presentan costes de mantenimiento por kW instalado mucho menores, estimándose este valor en torno al 2% por año de la inversión original (Amada).

Dentro del mantenimiento se incluye la gestión de la instalación, la revisión de los sistemas de seguridad, las revisiones periódicas de tornillería y elementos mecánicos, el cambio de consumibles, los ajustes de componentes, la protección anticorrosiva, el mantenimiento de la obra civil, etc.

La partida de O&M puede desglosarse en:

Aerogeneradores 87%

Resto de instalaciones 13%

Estos epígrafes se dividen a su vez en gastos de personal, repuestos y consumibles.

4.3 Ingreso de las instalaciones renovables

Actualmente muchos gobiernos del mundo (Alemania, Japón, EEUU, España, Grecia, Italia, Francia,...) están subvencionando las instalaciones con un objetivo estratégico de diversificación y aumento de las posibilidades tecnológicas preparadas para crear electricidad de forma masiva. La gran mayoría de las instalaciones conectadas a red están motivadas por primas muy elevadas a la producción, pagándose al productor 5 o 6 veces el coste de la energía eléctrica generada por vías tradicionales.

En Yibuti no existe un marco regulatorio para promover la utilización de la energías renovables. El ingreso total de la instalación eólica depende fundamentalmente del precio (\$/kWh) de venta de la energía eléctrica de origen renovable inyectada en la red eléctrica de la nación. En Yibuti, la tarifa eléctrica para la venta del kWh a los consumidores es aproximadamente 0,28 US\$/kWh. La tarifa de compra de energía eléctrica a la vecina Etiópe mediante las centrales hidroeléctricas es de 0,06 US\$/kWh, mucho más barata a la energía eléctrica producida por las centrales térmicas del país.

Para determinar el periodo de recuperación de las inversiones iniciales de los parques eólicos, se debe fijar el precio o tarifa de venta de la energía eléctrica producida a partir de fuentes renovables. Esta tarifa es la que proporciona los ingresos anuales de la inversión realizada y con ellos el periodo de recuperación.

Para el cálculo de la rentabilidad para la inversión inicial, se determinará los ingresos de las plantas de energías renovables mediante las dos tarifas vigentes en Yibuti, 0,06 US\$/kWh y 0,28 US\$/kWh, para luego realizar las comparaciones necesarias y demostrar así la rentabilidad o no del proyecto.

El ingreso anual de las plantas eólicas viene dada por:

$$I = T_{elec} * E_{AC} \quad (Ec\ 4.1)$$

Siendo

T_{elec} : Tarifa energética (\$/kWh).

E_{AC} : La energía producida en kWh/año.

- Ingresos de los parques eólicos, US\$/año

$$I = 0,06\$/kWh * 244\ 872\ 330\ kWh/año$$

$$I = 14\ 692\ 339,8\ US\$/año$$

$$I = 0,28\ \$/kWh * 244\ 872\ 330\ kWh/año$$

$$I = 68\ 564\ 252,4\ US\$/año$$

Los ingresos totales de las plantas eólicas se determinaron mediante la suma de los ingresos por la venta de energía eléctrica y por el obtenido mediante el ahorro de emisiones de CO₂ (ver epígrafe 4.6).

Los ingresos anuales totales ascienden a:

- Por parte del parque eólico con tarifa de 0,06\$/kWh y 0,28 \$/kWh respectivamente

$$I_T = 15\ 561\ 634,8\ US\$/año$$

$$I_T = 69\ 433\ 547,4\ US\$/año$$

4.4 Criterio de rentabilidad

Existen muchos métodos para la evaluación de proyectos, aunque los más difundidos en la actualidad, y los más confiables, son aquellos que toman en consideración la variación del valor del dinero en el tiempo al analizar los beneficios y costos esperados durante la vida útil del equipamiento.

El valor del dinero en el tiempo significa que un determinado capital que se tiene en la actualidad va incrementando su valor en el futuro a determinada tasa de interés fijada.

El estudio de la rentabilidad del proyecto de energías renovables, se realizará a partir de los siguientes parámetros:

- Valor actualizado neto de la inversión (VAN)
- Periodo de recuperación de la inversión (PRI)

El valor actualizado neto permite conocer el valor que tendrá la inversión en el futuro expresado en relación al valor del dinero a día de hoy. La importante diferencia entre el valor futuro y el valor actualizado neto obliga a considerar este último como el parámetro realmente representativo para el análisis de rentabilidad. Esta corrección, como se indicó, es denominada expresión del capital futuro en divisa de hoy

El valor actualizado neto (VAN), se define como (Nordelo & Yanes, 2006):

$$VAN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1 + D)^i}$$

Donde:

K_0 : Inversión o capital inicial, US\$

FC_i : flujo de caja libre en el año i , US\$/año

n : número de años

D : tasa de descuento real utilizada, US\$/año

Si cuando $i=n$, el VAN sigue siendo negativo, la inversión no es rentable. Y cuando el VAN se iguala a cero, tomamos i como el tiempo en años de amortización de nuestra inversión o lo que se conoce como el periodo de recuperación de la inversión (PRI)

De forma general, el flujo de caja se puede calcular como:

$$FC_i = (I_i - G_i - Dep) \times (1 - T/100) + Dep$$

Donde

I - Ingresos en el año i , \$/año

G - Gastos en el año i , \$/año.

T - Tasa de impuestos sobre ganancia, %.

Dep - Depreciación del equipamiento o amortización de la inversión, \$/año.

Existen varios métodos para determinar la depreciación aunque la más común es considerarla lineal:

$$Dep = \frac{K}{n}$$

En este y otros métodos que toman en cuenta el valor del dinero en el tiempo, la tasa de descuento apropiada debe determinarse externamente al proyecto, tomando como referencia el uso alternativo que se le puede dar al dinero y el riesgo de realizar la inversión.

- Criterio de rentabilidad de los parques eólicos

Los gastos de explotación son fundamentalmente gastos de operación y de mantenimiento y representan un 2% por año de la inversión original. Estos gastos ascienden aproximadamente a:

$$G = 2\,872\,000 \text{ US\$/año}$$

La depreciación del equipamiento o amortización de la inversión viene siendo entonces:

$$Dep = \frac{K}{n} = \frac{143\,600\,000}{20}$$

$$Dep = 7\,180\,000 \text{ US\$/año}$$

Según el código general de impuestos de Yibuti en el año 2011 en la sección 2 del capítulo 2, la tasa de impuestos sobre ganancia profesional es de 25% de la ganancia neta imponible (La maison des impôts, 2011).

El margen de riesgo de esta inversión consiste a fijar una tasa de riesgo en caso que no se produzca la energía eléctrica esperada. La producción de energía en el caso de los parques eólicos puede estar afectada principalmente a escases de velocidades adecuadas del viento debido a la naturaleza aleatoria de este último, y también por las paradas de las máquinas eólicas para mantenimientos y/o averías. A fin de disminuir el riesgo de consecuencias económicas adversas, se tomara un margen de riesgo de 1% en el cálculo de rentabilidad.

El bajo valor de este factor está dado porque en las regiones donde serán instalados los aerogeneradores eléctricos, no existe posibilidad de utilización en otros servicios y su subsuelo no presenta yacimientos minerales u otros valores de interés conocidos hasta la fecha.

A lo anterior se suma que la República de Yibutí tiene una alta estabilidad política y económica y no se aprecian posibilidades de riesgos sociales, como tampoco por desastres naturales.

La inflación es el fenómeno del aumento generalizado de los precios, y corresponde entonces a la pérdida del valor monetario. En Yibuti, generalmente no se observa una tasa de inflación alta. Se registró en 2002 una tasa de 2% aunque llegó en 2008, debido a la crisis financiera mundial, un 12% en todo el territorio. Se tomará una tasa de inflación de 6% para el análisis de rentabilidad del proyecto.

Debido a la escasez de datos económico relacionado con Yibuti, no se pudo encontrar la tasa de descuento real que se le aplica a las inversiones de proyectos de energía renovables. La tasa de descuento real vigente en Cuba oscila entre 7-15% de los ingresos anuales de las inversiones realizadas (Lorenzo, 2014). En nuestro caso, se tomará una tasa de descuento real de 10% para el análisis económico del periodo de recuperación.

A continuación se muestra el análisis final sobre el criterio de rentabilidad del proyecto y los parámetros principales que influirán en su ejecución futura.

- El análisis de rentabilidad de los parques eólicos.

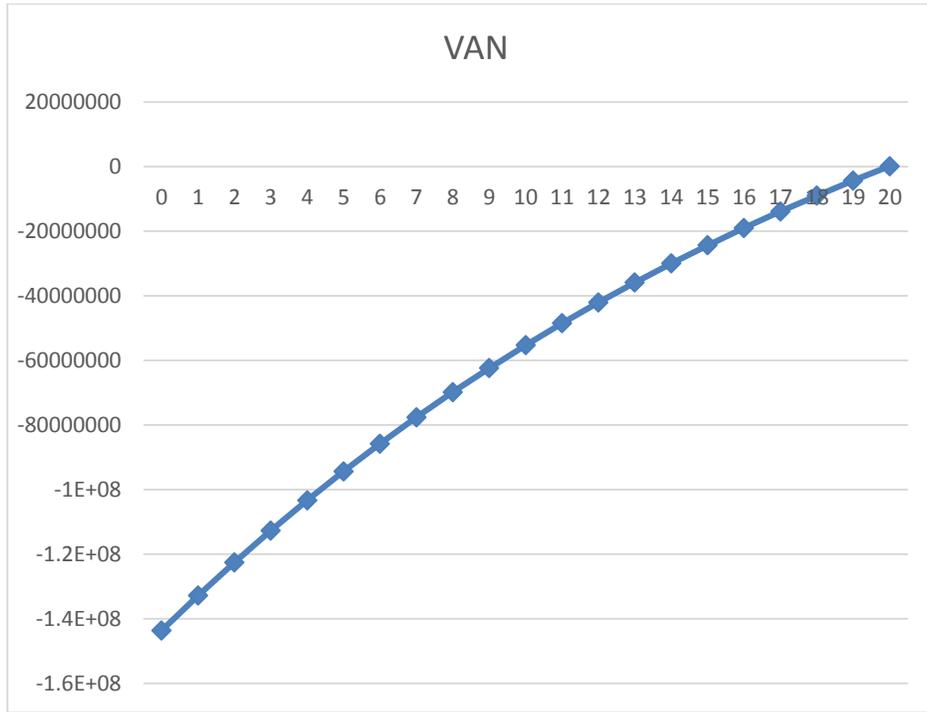


Fig. 4.2. El valor actualizado neto (VAN) para una tarifa de 6 cent\$/kWh.

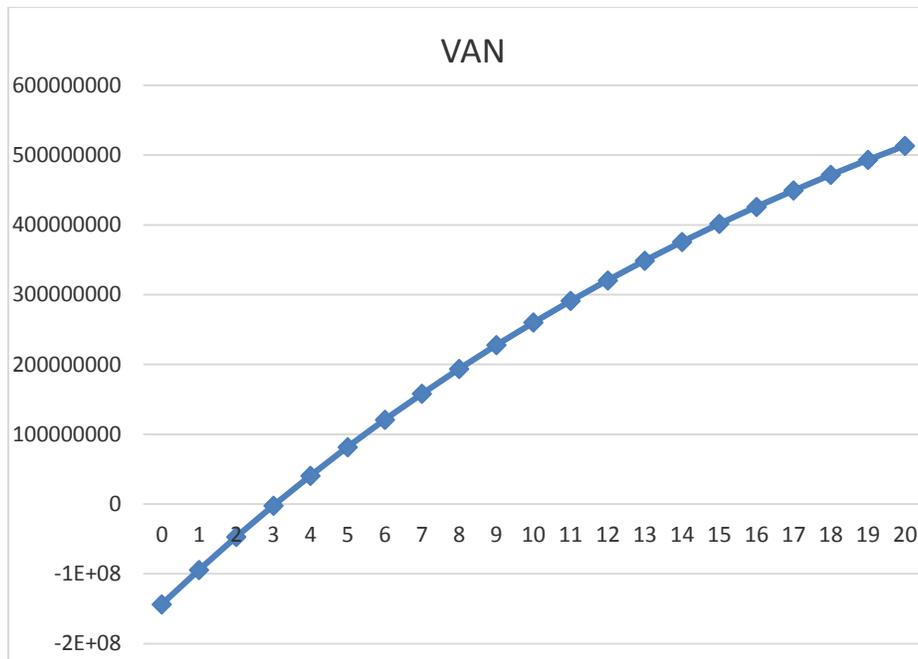


Fig. 4.3. El valor presente neto (VAN) para una tarifa de 28 cent\$/kWh.

En las figuras 4.2 y 4.3 se muestran los valores actualizados netos de la inversión en el periodo de vida del proyecto eólico estimado a 20 años. Como se refleja en las figuras anteriores, la rentabilidad del proyecto eólico depende fundamentalmente del precio de venta del kWh de la energía eléctrica producida.

En la figura 4.2, se recupera la inversión inicial a partir del último año, se empiezan a obtener beneficios. Es lo que llamamos periodo de retorno o Payback.

Los beneficios totales de los parques eólicos, son de 121 513,55 US\$.

A diferencia de la primera variante, en la figura 4.3, se recupera la inversión inicial a partir del cuarto año y se empiezan a obtener beneficios.

Los beneficios totales de los parques eólicos, son 513 452 361 US\$.

4.5 Análisis económico desde el punto de vista ambiental

Los beneficios ambientales del proyecto objeto del estudio, se centran básicamente en la reducción de emisiones gaseosas al ambiente, siendo éstas de dos tipos principales: de efecto global (CO₂) y de efecto local (CO, SO₂, NO_x, PM₁₀).

Dentro de las emisiones de efecto global se encuentra el dióxido de carbono, el cual es uno de los denominados “gases de efecto invernadero”, cuyo aumento de concentración provoca una mayor retención de la radiación emitida por la superficie del planeta con consecuencias en el régimen térmico de la atmósfera.

Dentro de las emisiones de efecto local, se encuentran el SO₂, CO y el NO_x, los cuales más allá de los efectos locales conocidos, tal como el de la lluvia ácida, contribuyen en forma indirecta al efecto invernadero.

La preocupación internacional por el fenómeno del cambio climático y por tomar acciones tendientes a detener la concentración de los gases de efecto invernadero, se plasma en iniciativas tales como el **Fondo de Medio Ambiente Mundial (GEF) y el Protocolo de Kyoto.**

Los combustibles fósiles en mayor o menor medida todas ellas emiten a la atmósfera dióxido de carbono, CO₂. Según el combustible, y suponiendo un rendimiento del 40% (Central termoeléctrica, 2008) sobre la energía primaria consumida, una central térmica emite aproximadamente:

Tabla 4.6. Emisión de CO₂. (Fuente: (Wikipedia, Energía renovable, 2012))

Combustible	Emisión de CO ₂ , kg/kWh
Gas natural	0,44
Fueloil	0,71
Biomasa (Leña, madera)	0,82
Carbón	1,45

La producción de energía eléctrica que se pudiera generar mediante los parques eólicos ascendió a 244 872,33 MWh/año. Las centrales electrógenas de Yibuti funcionan a base de fueloil pesado como combustible. Considerando que el fueloil pesado tenga las mismas propiedades químicas que el fueloil que aparece en la tabla 4.3 para la generación de energía eléctrica, la emisión de CO₂ evitada por kWh de energía producida mediante los parques eólicos será:

$$m_{CO_2} = 0,71 \text{ kg/kWh}$$

$$e_{producida} = 244\,872\,330 \text{ kWh/año}$$

$$m_{CO_2} = 0,71 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} * 244\,872\,330 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$m_{CO_2} = 173\,859\,354,3 \text{ kg/año}$$

Se evitará la contaminación de la atmósfera con 173 859 toneladas de CO₂ al instalar los parques eólicos para la producción de energía eléctrica.

En el Protocolo de Kyoto los países industrializados de la Convención Marco de Cambio Climático se comprometieron a una reducción de 5,2% en las emisiones de gases de efecto invernadero lo que sentaría las bases para el establecimiento de un sistema internacional de comercio de permisos de emisión.

La unidad comercializable que parecería ser la más ampliamente aceptada es la tonelada de carbono como CO₂. Diversas estimaciones sitúan el precio de la tonelada de carbono entre US\$ 10 y 70 lo que es equivalente a la tonelada de CO₂ entre US\$ 3 y 20. Para la evaluación económica del ahorro de emisiones de CO₂ se toma el valor de 5 US\$/ton de CO₂ que es valor de comercialización más utilizado internacionalmente (P. Mosto, 2001).

El ingreso para las plantas de energía eólica en términos de reducción de emisiones de CO₂ aplicando el valor de 5 US\$/ton de CO₂ viene siendo unos 869 295 US\$/año.

4.6 Impacto ambiental de los parques eólicos

Todas las fuentes de energía producen algún grado de impacto ambiental. Las instalaciones de conexión a red de origen renovable tienen un impacto medioambiental muy por debajo a las centrales termoeléctricas convencionales que utilizan como combustibles el carbón, el petróleo y el gas natural.

La energía eólica es una de las energías renovables que tiene menos impacto negativo al medio ambiente siendo una energía limpia y también la menos costosa de producir (Wikipedia, Energía eólica, 2012), lo que explica el fuerte entusiasmo por esta tecnología.

4.6.1 Impacto ambiental de los parques eólicos

La energía eólica produce impacto visual en el paisaje, ruido de baja frecuencia, puede ser una trampa para aves. Existen medidas internacionales para reducir este impacto ambiental por lo que no será un aspecto negativo que imposibilite el uso de la energía eólica.

4.6.1.1 Impacto visual de los aerogeneradores

La intrusión visual del paisaje es el cuestionamiento más frecuente que se hace contra los aerogeneradores y el principal factor que condiciona la aceptación pública de la energía eólica. También pueden ocurrir efectos ópticos molestos al cruzarse las palas con los rayos del sol naciente y poniente, en parques eólicos próximos a lugares habitados. Este es un problema que debe tenerse en cuenta en cualquier proyecto eólico en fase de desarrollo, pues constituye un impacto ambiental difícil de cuantificar y necesita ser investigado con mayor profundidad si se le compara con otros impactos negativos.

Cuando se diseña un parque eólico adecuadamente, los aerogeneradores quedan muy atractivos y adquieren una combinación armónica con el paisaje.



Fig.4.4. Parque eólico de Kappel (Dinamarca). (Fuente: Danish Wind Industry Association)

4.6.1.2 Ruidos de los aerogeneradores

El ruido es un sonido molesto o indeseado y tiene varios orígenes:

- El ruido mecánico provocado por el roce y el impacto de las piezas móviles en el tren de fuerza, que depende de la rugosidad de las superficies de trabajo de los cojinetes y engranajes, así como de las velocidades de rodamiento y deslizamiento entre las piezas.
- El ruido magnético producido por los generadores, sobre todo por aquellos que están conectados a la línea mediante convertidores de frecuencia. Este ruido puede reducirse disminuyendo la frecuencia de conmutación de las válvulas electrónicas de los convertidores de frecuencia, pero ello afecta otros parámetros operacionales importantes.
- El ruido aerodinámico producido principalmente por el movimiento de las palas, que depende en general de la forma y material de las palas, la existencia de turbulencias y la propia velocidad del viento. Por este motivo se limita la velocidad de la punta de las palas a 65 m/s en los aerogeneradores instalados en tierra y hasta 80 m/s para los parques fuera de costa.

En la tabla 4.7 se exponen algunos niveles de ruido típicos de equipos y locaciones diversas, comparados con el de un parque eólico distante.

Tabla 4.7. Niveles de ruido típicos comparados con el de un parque eólico distante. (Fuente: Cubasolar)

Equipo o locación	Nivel de ruido, dB (A)
Umbral de la audición, inaudible	0
Ruido nocturno en el campo	20-40
Dormitorio silencioso	35
Parque eólico, a 350 m de distancia	35-45
Automóvil moviéndose a 65 km/h, a 100 m de distancia	55
Oficina bulliciosa en plena actividad	60
Camión moviéndose a 50 km/h, a 100 m de distancia	65
Perforadora neumático, a 7 m de distancia	95
Avión a reacción, a 250 m de distancia	105
Umbral de dolor, daños al oído	140

4.6.1.3 Impacto sobre la fauna.

Las aves pueden chocar con las palas del rotor de la turbina, o quedar atrapados en la turbulencia que hay detrás del rotor. Las investigaciones han mostrado que el riesgo de choque es relativamente pequeño. El número estimado de choques accidentales para una potencia instalada de 1.000 MW es aproximadamente de 21.000 anuales. Si bien esto puede parecer a primera vista un número bastante grande, cuando lo consideramos anualmente, esta cifra es en realidad muy pequeña en comparación con el número de aves que son víctimas mortales del tráfico de automóviles cada año (2 millones anualmente) o el número de pájaros que perecen cada año debido a las líneas eléctricas (1 millón anualmente). La mayoría de los accidentes con los aerogeneradores que implican a los pájaros suceden por la noche, el crepúsculo, o con mal tiempo. Las aves conocen su forraje y tierras de descanso muy bien, y saben cómo evitar las turbinas eólicas. No obstante, cuando se instalan aerogeneradores, es aconsejable prestar atención a las zonas de cría y forrajeo de las aves (Hulshorst & Criado).

❖ Conclusiones Parciales

1. El proyecto de los parques eólicos a instalar en Yibuti para la producción de energía eléctrica es económicamente factible.
2. El presupuesto total por conceptos de aerogeneradores, obra civil, la conexión a la red, el estudio de viabilidad de la inversión de los parques eólicos ascendió a 143 600 000 US\$.
3. EL periodo de recuperación de la inversión del proyecto eólico es de 4 años aplicando una tarifa 28 cent\$/kWh para la venta de la energía eléctrica producida por los parques eólicos.
4. La producción de energía eléctrica mediante los parques eólicos evita la emisión a la atmosfera de 173 859 toneladas de CO₂ con un ingreso, en términos de reducción de emisiones, de 869 295 US\$ cada año.

CONCLUSIONES GENERALES

❖ CONCLUSIONES GENERALES

1. El uso de la energía eólica en la Republica de Yibuti es perfectamente factible desde el punto de vista técnico y económico con regiones de alto potencial eólico.
2. Las regiones de Gali Maaba y Ghoubet tienen un factor de planta medio de 47,52% siendo este valor muy significativo ya que el parque eólico en la zona del Istmo de Tehuantepec, en el sur de México, por sus altas velocidades de viento, es uno de los parques eólicos de mayores factores de capacidad en el mundo, alcanzando 51,7% durante su primer año.
3. Se pretende producir e inyectar en la red eléctrica del país, mediante los parques eólicos de Grand Bara, Ghoubet y Gali Maaba, 244 872,33MWh por año.
4. El costo total estimado de los parques eólicos a instalar en Yibuti ascendió los 143 600 000 U\$D. En el cuarto año, a partir de su puesta en marcha, se recuperará la inversión inicial con una tarifa de venta 28 cent\$/kWh.
5. El ingreso total de los parques eólicos, al culminar los 20 años de vida útil, es de 513 452 361 US\$ ganando como beneficios acumulados casi 30% por encima de la inversión realizada.
6. Al instalar los parques eólicos se contribuirá a la protección del medio ambiente evitando la contaminación de la atmósfera con 173 859 toneladas de CO₂ cada año.

RECOMENDACIONES

❖ RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la recolección de datos de velocidades de viento en los sitios seleccionados de hasta 10 años para obtener un mejor comportamiento de la naturaleza aleatoria del viento.
2. Se debe utilizar la distribución de Weibull ya que permite simular con mayor exactitud el comportamiento de un mayor número de sitios, y ayuda a minimizar los errores de estimación del potencial eólico.
3. Realizar un estudio económico más riguroso que permita valorar con mucha precisión el costo total de la instalación eólica.
4. Se debe fijar tarifas especiales para la compra de energía eléctrica de origen renovable para estimular el desarrollo energético en este campo.

BIBLIOGRAFÍA

❖ BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. B., & Portuondo, M. T. (n.d.). *Elementos para una evaluación técnico-económica de un sistema fotovoltaico conectado a la red electroenergética de Cuba*. Retrieved Marzo 17, 2014
- Afriquinfos. (2013, Junio Lundi). Retrieved from L' actualité africaine a la minute.
- Álvarez, C. (2006, Septiembre). *Energía eólica*. Madrid, España.
- Amada, J. M. (n.d.). *CURSO DE ENERGÍA EÓLICA*. Zaragoza: Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.
- Awaleh, S. I. (2007). *Evaluation des ressources eoliennes de Djibouti*. Yibuti: Centre d'étude et de recherche de Dibouti (CERD).
- Benítez, A. M. (2009, Junio). *PROYECTO DE UN PARQUE EÓLICO*. Madrid, España.
- Bondolich, C. V. (n.d.). *Un marco regulatorio integral como el principal desafío para el fomento y desarrollo de la industria de las energías renovables*. Argentina.
- (2008). *Central termoeléctrica*. España: Wikipedia.
- Costos de Construcción de un Sistema Solar Fotovoltaico* . (2011, Septiembre). Retrieved from <http://www.energiasrenovables hoy.net>
- Díez, P. F. (2003). *Energías Alternativas*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Dr.ing.Di Prátula, H. R. (2009). *Energía eólica*. Internet.
- EDD, S. (2014, Janvier). *L Electricité de Djibouti*. Retrieved from Sitio de la empresa de Electricité de Djibouti.
- Figuro, C. M. (2011). *ENERGÍA EÓLICA. TECNOLOGÍA Y APLICACIONES*. La Habana: Editorial Academia.

- Gipe, P. (1993). *Wind Power for Home & Business*. USA :Chelsea Green Publishing Company.
- Hernández, M. (n.d.). Medición y tratamiento de los datos de viento. *II Máster Energía Solar y Renovables* (p. 23). España: II Máster. Energía Solar y Renovables .
- Hulshorst, W., & Criado, V. (n.d.). Manual Práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala. Madrid, España: leonardo-energy.
- John, F. (1993). *Turbine Blade Theory and Praxis Based on Experience from the 4th Period of Wind Electrical Power Generation*. Dinamarca : Compedium in Wind.
- La maison des impôts. (2011). DJIBOUTI - CODE GENERAL DES IMPOTS 2011. Ciudad de Yibuti, Yibuti.
- Lorenzo, D. G. (2014, Junio 10). La tasa de descuento real en Cuba. (J. P. Yanes, Interviewer) Cienfuegos, Cuba.
- Maritime Information Services Ltd.* (2014). Retrieved from Port Technology international.
- Ministerio de Energía encargado de Recursos naturales. (2013, Mayo 29-30). Forum de dialogue sur le secteur de l'énergie à Djibouti. Ciudad de Yibuti, Yibuti.
- Nordelo, A. E., & Yanes, J. P. (2006). *GESTIÓN Y ECONOMÍA ENERGÉTICA*. Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos.
- P, A. V., & F, C. M. (2013, Juni 25-27). Marco regulatorio de las fuentes renovables de energía. La Habana, Habana, Cuba.
- P. Mosto, M. I. (2001, Agosto 08). EVALUACION ECONÓMICA DE UN PARQUE EOLICO DE 20 MW. Argentina.
- Partnership, A.-E. E. (2013, Mayo 29-30). Aperçu du marché électrique: Djibouti. Ciudad de Yibuti, Yibuti.
- Priem, Y. (2013, Mayo 13). *Sur la route de l'Énergie : un instantané sur Djibouti* . Retrieved Marzo 16, 2014, from Le site des alternatives solidaires et responsables.

RTD. (2014). Retrieved from Sitio de la Radio Television de Djibouti.

Sitienei, I. (2013, junio 5). *La Banque mondiale soutient Djibouti dans sa recherche d'énergies renouvelables peu coûteuses*. Retrieved marzo 16, 2014, from GROUPE DE LA BANQUE MONDIALE.

Wikipedia. (2012). Energía eólica. *Energía renovable*.

Wikipedia. (2012). *Energía renovable*. Retrieved from Wikipedia.

Wikipedia. (2014, abril 3). *Wikipedia, la enciclopedia libre*.

Wind Power, A Clean and Renewable Energy. (n.d.). Retrieved Abril 11, 2014, from Renewable Energy - as Large-Scale Clean Resource for Energy-Short World: <http://www.renewableenergyst.org/wind>

ANEXOS

ANEXO: 1 Instrumentación para la medición de viento.

Los instrumentos de medida necesarios en energía eólica son los anemómetros, las veletas, los termómetros y los barómetros y van montados sobre torres meteorológicas.

ANEMÓMETROS: Los anemómetros son los instrumentos utilizados para determinar la velocidad del viento. Pueden clasificarse según su principio de operación.

- Anemómetros de rotación

Estos anemómetros se componen de dos partes: el molinete y el transductor.

El **molinete** puede estar constituido:

- Cazoletas: el eje de rotación es perpendicular a la componente del viento medida.
- Rotor: el eje de rotación es paralelo a la componente medida.

El **transductor** asegura la conversión de la velocidad de rotación en una señal utilizable para la medida.



Anemómetro de cazoletas



Anemómetro de hélice o rotor

- Anemómetros de presión

La medida de la velocidad del viento se registra mediante los efectos de las variaciones de presión que ejerce el aire cuando se mueve.

Están encaminados más que a medir la velocidad del viento a medir la rafagosidad, mediante galgas extensométricas acopladas a una esfera perforada, midiendo así la magnitud y dirección del viento.

VELETAS: Las **veletas** son el elemento empleado tradicionalmente para medir la dirección del viento y consiste en un dispositivo montado sobre un eje vertical y de giro libre, de tal modo que puede moverse cuando el viento cambia de dirección.

Normalmente, el movimiento de la veleta está amortiguado para prevenir cambios demasiado rápidos de la dirección del viento.

El transductor asociado a la veleta es un convertidor de ángulo. Hay diversos tipos de convertidores, aunque el más utilizado es el potenciómetro.



TERMÓMETROS: La medida de la temperatura se utiliza para la determinación de la potencia suministrada, así como para evaluar la climatología local en emplazamientos de parques eólicos.

Los termómetros corrientes basados en un elemento de resistencia de platino son los más utilizados.

Suelen ir acompañados de **higrómetro** para la medida de la humedad del aire.



Termómetros

BARÓMETROS: Sirven para medir la presión atmosférica que se utiliza para la determinación de la potencia suministrada en una instalación eólica. Generalmente se utiliza un barómetro meteorológico.



Barómetros

TORRES METEOROLÓGICAS: La estructura principal de las torres meteorológicas pueden ser: tipo tubular o de celosía. Además, estas pueden ser bien arriostrada o autoportante.



Torres meteorológicas

Deben estar diseñadas para poder soportar la velocidad máxima de viento del emplazamiento.

La altura de la torre dependerá de las medidas realizadas. En primer lugar se realiza un estudio del emplazamiento y después un estudio con torres de altura igual a la altura del rotor del aerogenerador.

Deberán estar pintadas con pintura resistente a la intemperie y según la normativa de Aviación Civil Internacional.

Deberán estar provistas de escalera de acceso, con sistema anticaído homologada y provista de descansillos, diseñados para soportar el esfuerzo máximo de caída de un trabajador.

Deberán estar provistas de sistema de p.a.t según ITC-BT-18. Deberán estar dotada de: pararrayos (≤ 50 cm), cable de derivación (50 mm^2) y anillo equipotencial.

ANEXO: 2 Fichas técnicas del aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW

Rotor	
Diámetro	80 m
Área de barrido	5.027 m ²
Velocidad de giro	9,0 - 19,0 rpm
Sentido de giro	Agujas del reloj (vista frontal)
Peso (incl. Bujé)	Aprox. 38 T
Peso (incl. Bujé y Nacelle)	Aprox. 108 T

Palas	
Número de palas	3
Longitud	39 m
Perfil	NACA 63.XXX + FFA-W3
Material	Fibra de vidrio preimpregnado de resina epoxy
Peso pala completa	6.500 kg

Torre tubular		
Tipo modular	Altura	Peso
3 secciones	60 m	127 T
3 secciones	67 m	145 T
4 secciones	78 m	201 T
5 secciones	100 m	283 T

Multiplicadora	
Tipo	1 etapa planetaria / 2 etapas de ejes paralelos
Ratio	1:100,5 (50 Hz) 1:120,5 (60 Hz)
Refrigeración	Bomba de aceite con radiador de aceite
Calentamiento aceite	2,2 kW

Generador 2.0 MW	
Tipo	Doubly-fed machine
Potencia nominal	2.0 MW
Tensión	690 V ac
Frecuencia	50 Hz / 60 Hz
Clase de protección	IP 54
Número de polos	4
Velocidad de giro	900: 1.900 rpm (nominal 1.680 rpm) (50 Hz) 1.080: 2.280 rpm (nominal 2.016 rpm) (60 Hz)
Intensidad nominal Estator	1,500 A @ 690 V
Factor de potencia (standard)	0,98 CAP - 0,96 IND a cargas parciales y 1 a potencia nominal.*
Factor de potencia (opcional)	0,95 CAP - 0,95 IND en todo el rango de potencias.*

* Factor de potencia en bornas de salida del generador en el lado de baja tensión antes de la entrada del transformador.

Diseño mecánico

Tren de potencia con eje principal soportado por dos rodamientos esféricos que transmiten las cargas laterales directamente al bastidor a través de un caballete. Esto evita que la multiplicadora reciba cargas adicionales, con lo que se reducen las posibilidades de avería además de facilitar su servicio.

Freno

Freno primario aerodinámico por puesta en bandera de las palas. Adicionalmente freno mecánico de disco hidráulicamente activado de emergencia situado en la salida del eje de alta velocidad de la multiplicadora.

Protección contra rayos

El aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW utiliza el sistema "protección total contra rayos", siguiendo la normativa IEC 61024-1. Este sistema conduce el rayo desde ambas caras de la punta de la pala hasta la raíz y desde ahí, a través de la nacelle y de la estructura de la torre, hasta el sistema de puesta a tierra de las cimentaciones. De esta forma, se protege la pala y se evita que los elementos eléctricos sensibles resulten dañados.

Sistema de control

Generador doblemente alimentado, controlado en velocidad y potencia mediante convertidores IGBT y control electrónico PWM (modulación por ancho de pulso).

Ventajas:

- ▶▶ Control de potencia activa y reactiva.
- ▶▶ Bajo contenido en armónicos y mínimas pérdidas.
- ▶▶ Aumento de la eficiencia y de la producción.
- ▶▶ Mejora de la vida útil de la máquina.

Gamesa SGIPE

Sistema de control de parques eólicos desarrollado por Gamesa, y su nueva generación Gamesa WindNet®, que permiten la operación y monitorización remota y en tiempo real de los aerogeneradores, mástil meteorológico y subestación eléctrica. Diseño modular con herramientas de control de potencia activa y reactiva, ruido, sombras y estelas. Arquitectura TCP/IP con interfaz Web.

Sistema de Mantenimiento Predictivo SMP

Sistema de mantenimiento predictivo para la detección prematura de posibles deterioros o fallos en los principales componentes del aerogenerador.

Ventajas:

- ▶▶ Disminución de grandes correctivos.
- ▶▶ Aumento de la disponibilidad y de la vida útil de la máquina.
- ▶▶ Condiciones preferenciales en las negociaciones con las aseguradoras.
- ▶▶ Integración con el sistema de control.

Control del ruido

Diseño aerodinámico de punta de pala y diseño de componentes mecánicos que minimizan el ruido emitido. Adicionalmente, Gamesa ha desarrollado el sistema de control de ruido GAMESA NRS®, que permite programar el ruido emitido de acuerdo con criterios como fecha, hora o dirección del viento. De este modo se logra el cumplimiento de las normativas locales con una producción máxima.

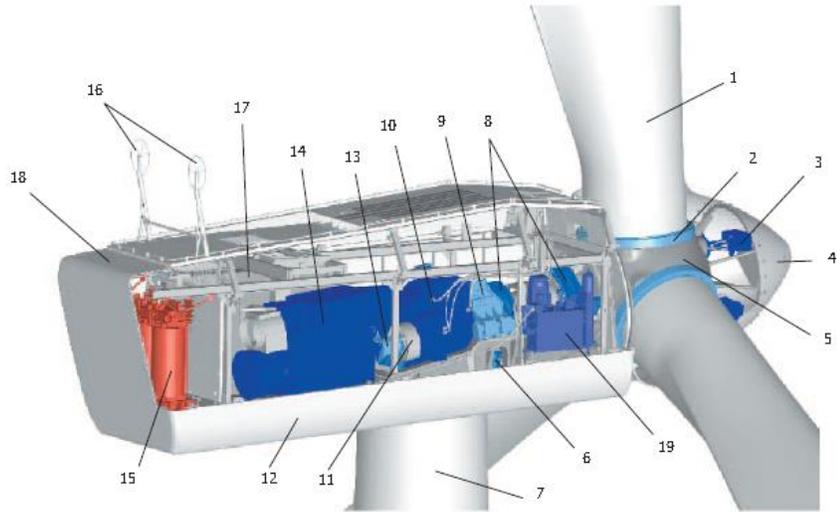
Conexión a red

Los aerogeneradores doblemente alimentados de Gamesa y las tecnologías de Crowbar Activo y convertidor sobredimensionado aseguran el cumplimiento de los más exigentes requerimientos de conexión a red.

Soporte a huecos de tensión y Regulación dinámica de potencia activa y reactiva.



- 1 Pala
- 2 Rodamiento pala
- 3 Actuador hidráulico del pitch
- 4 Cubierta del buje
- 5 Buje
- 6 Control orientación
- 7 Torre
- 8 Eje principal con dos rodamientos
- 9 Amortiguadores
- 10 Multiplicadora
- 11 Freno de disco principal
- 12 Soporte de la nacelle
- 13 Transmisión: Eje de alta velocidad
- 14 Generador doblemente alimentado
- 15 Transformador
- 16 Anemómetro sónico y veleta
- 17 Armario de control
- 18 Cubierta de la nacelle
- 19 Unidad hidráulica

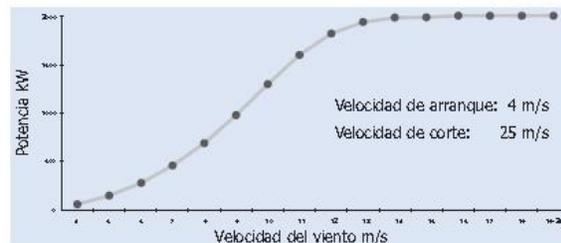


Curva de Potencia Gamesa G80-2.0 MW

(para una densidad del aire de 1,225 kg/m³)

Curva de potencia calculada con base a datos de perfiles aerodinámicos NACA 63.XXX y FFA-W3 (perfiles de pala).

Parámetros de cálculo: 50 Hz de frecuencia de red; ángulo de calado de pala variable (control tipo pitch); intensidad de turbulencia del 10% y una velocidad variable del rotor de 9,0 - 19,0 rpm.



VELOCIDAD (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19-25
POTENCIA (kW)	66.3	152.0	280.0	457.0	690.0	978.0	1,296.0	1,598.0	1,818.0	1,935.0	1,980.0	1,995.0	1,999.0	2,000.0	2,000.0	2,000.0

ANEXO: 3 Potencias generadas del aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW. Región de Grande Bara

Velocidad (m/s)	Potencia del aerogenerador (kW)	p(v) %	Potencia real (kW)
1	0	0,03539854	0
2	0	0,06707117	0
3	0	0,09193794	0
4	66,3	0,10805583	6,437971
5	152	0,11484708	16,03697
6	280	0,11303424	29,86933
7	457	0,10433082	46,45279
8	690	0,0909929	63,45884
9	978	0,07535463	77,65403
10	1296	0,05945173	85,05332
11	1598	0,04479208	83,18277
12	1818	0,03228352	72,15905
13	1953	0,02228852	56,89671
14	1980	0,0147554	40,7976
15	1995	0,00937447	28,03816
16	1999	0,00571946	18,49252
17	2000	0,00335282	11,75884
18	2000	0,00188933	7,219118
19	2000	0,00102378	4,282876
20	2000	0,00053365	2,456157
21	2000	0,00026764	1,361958
22	2000	0,00012919	0,730398
23	2000	6,0025E-05	0,378906
24	2000	2,6852E-05	0,190176
25	2000	1,1567E-05	0,092363
Total	33 262,3	≈ 1	565,22

- **Región de Ghoubet**

Velocidad (m/s)	Potencia del aerogenerador (kW)	p(v) %	Potencia real (kW)
1	0	0,01962527	0
2	0	0,03810075	0
3	0	0,05438821	0
4	66,3	0,06765741	4,48568622
5	152	0,07735515	11,7579826
6	280	0,08323889	23,3068895
7	457	0,08537306	39,0154893
8	690	0,08409159	58,0231956
9	978	0,07993497	78,176396
10	1296	0,07357291	95,3504976
11	1598	0,06572435	105,02751
12	1818	0,05708506	103,780641
13	1953	0,04827076	94,2727988
14	1980	0,0397796	78,7636037
15	1995	0,03197475	63,7896215
16	1999	0,02508484	50,1445944
17	2000	0,01921798	38,435958
18	2000	0,01438437	28,7687311
19	2000	0,0105226	21,045206
20	2000	0,00752563	15,0512622
21	2000	0,00526341	10,5268282
22	2000	0,00360079	7,2015868
23	2000	0,00241003	4,82006173
24	2000	0,0015784	3,15680109
25	2000	0,00101169	2,02338797
Total	33 262,3	≈ 1	937

- **Región de Gali Maaba,**

Velocidad (m/s)	Potencia teórica del aerogenerador (kW)	p(v) %	Potencia real del aerogenerador (kW)
1	0	0,01878019	0
2	0	0,03650726	0
3	0	0,0522259	0
4	66,3	0,06516379	4,3203592
5	152	0,07479355	11,3686201
6	280	0,08086478	22,6421391
7	457	0,08340391	38,1155864
8	690	0,08268462	57,0523871
9	978	0,07917532	77,4334604
10	1296	0,07347271	95,2206297
11	1598	0,06623136	105,83771
12	1818	0,05809829	105,622687
13	1953	0,04965954	96,9850909
14	1980	0,04140291	81,9777673
15	1995	0,03369797	67,2274566
16	1999	0,0267922	53,5576046
17	2000	0,02081993	41,6398651
18	2000	0,01582017	31,6403377
19	2000	0,0117589	23,5177951
20	2000	0,00855231	17,1046258
21	2000	0,00608807	12,1761402
22	2000	0,00424283	8,48566679
23	2000	0,00289534	5,79068925
24	2000	0,00193504	3,87007142
25	2000	0,00126675	2,5334903
Total	33 262,3	≈ 1	964,12