

SISTEMA HÍBRIDO (SOLAR-EÓLICO) CON APOYO DE GAS NATURAL PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN BAJA CALIFORNIA SUR (MÉXICO)

Yolanda Fernández Ribaya^[*], Eunice Villicaña Ortiz^[], Jorge Xiberta Bernat^[**],
[*] Alumno; [**] Tutores
UO187494@uniovi.es**

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Una aplicación prometedora de las energías renovables son las instalaciones de sistemas híbridos, formados por energías renovables (solar, eólica, biomasa e hidráulica) y energías convencionales. El estado mexicano de Baja California cuenta con importantes recursos eólicos y solares para la generación de electricidad; sin embargo debido a su naturaleza intermitente, estas fuentes requieren de un sistema de apoyo convencional para garantizar el suministro eléctrico. Este estudio describe el desarrollo y dimensionamiento de un prototipo de sistema híbrido de 3,6 MW formado por una instalación solar-eólica y un sistema de apoyo de gas natural (GN).

ABSTRACT

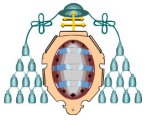
A promising application of renewable energies is the facilities of hybrid systems composed of renewable energies (solar, wind, biomass and hydro) and conventional energies. The Mexican State of Baja California has significant wind and solar resources for the generation of electricity; however due to its intermittent nature, these sources require a conventional support system to ensure the electrical supply. This paper describes the development and design of a prototype of a hybrid

system of 3.6 MW formed by a solar-wind installation and a support system of natural gas

1 INTRODUCCIÓN

Después de las "crisis del petróleo", muchas tecnologías de aprovechamiento de energías renovables han madurado y evolucionado, aumentando su confiabilidad y mejorando su rentabilidad para diversas aplicaciones en distintos lugares del mundo.

México es un país con una superficie de unos dos millones de kilómetros cuadrados y 112,4 millones de habitantes [1]. Además de su riqueza en recursos fósiles, también cuenta con un gran potencial en recursos energéticos renovables debido principalmente a su ubicación geográfica y extensión territorial. Sin embargo, el desarrollo de estos recursos se ha visto limitado por su coste relativamente alto y por las restricciones presupuestarias del Estado, lo que ha llevado a optar por tecnologías más económicas para la generación de electricidad. Tal es caso de la reciente expansión de centrales de ciclo combinado y de otras centrales termoeléctricas, que operan con GN, por ser menos contaminante que las que consumen carbón o derivados del



petróleo, son más eficientes y tienen unos costes de inversión y plazos de construcción más cortos [2].

Las fuentes renovables son una clara alternativa a las energías convencionales para la generación de energía eléctrica. Centrándonos en la energía solar y eólica, éstas son fuentes inagotables de energía, no contaminantes y cuyo potencial depende del lugar del emplazamiento.

El principal inconveniente de las tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables es la dependencia de procesos naturales variables (horas de sol y velocidad del viento), lo que hace que en algunos casos su disponibilidad no sea predecible o controlable. Por ello, una de las más prometedoras aplicaciones de estas fuentes son las instalaciones de tipo híbrido, que consumen energías renovables y convencionales, con el objetivo de garantizar una producción determinada de electricidad e incrementar la participación de las renovables en el sector eléctrico.

En México, en 2010, la participación de las fuentes renovables en la demanda energética nacional representó solamente el 4% [3], ello ha determinado que la política energética del país tenga como objetivo prioritario establecer los mecanismos que permitan el desarrollo de un modelo energético diversificado y más sostenible, donde las energías renovables tengan un mayor grado de contribución.

En este trabajo se lleva a cabo el desarrollo de un sistema híbrido solar/eólico para generación eléctrica con un sistema de apoyo, turbina de gas.

Esta instalación de 3,6 MW con conexión a red, está constituida por un subsistema solar de 1,2 MW y otro eólico de 1,8 MW y una turbina de gas de 0,6 MW, que consume GN.

Esta instalación tiene como finalidad garantizar un suministro eléctrico base de 0,6 MW al municipio de La Paz en Baja California Sur, aprovechando las fuentes de energías renovables disponibles en dicho lugar.

2 MÉTODO DE TRABAJO

El estado mexicano de Baja California Sur (BCS) se ubica al noroeste del territorio, ocupando la mitad sur de la Península de Baja California. Limita al norte con el estado de Baja California Norte, al este con el Mar de Cortés y al Sur y Oeste con el Océano Pacífico, siendo su capital la ciudad de La Paz. BCS se extiende por una superficie de 20.275 km² y cuenta con una población 219.596 habitantes [4]. (Figura 1)



Figura 1: Localización municipio de La Paz, BCS-México.

Este territorio alberga recursos solares, eólicos, geotérmicos y marinos [5] [6] [7] [8]. De forma particular, el municipio de La Paz cuenta con recursos solares y eólicos así como grandes extensiones de tierra necesarias para la instalación del sistema híbrido propuesto.

2.1 Disponibilidad del recurso solar y eólico

México es uno de los países con mayor promedio de radiación solar anual [9]. De acuerdo al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), los índices de radiación diario promedio anual oscilan entre 4,7 kWh/m² y 6,3 kWh/m², siendo mayores en la costa del Pacífico [5] (Figura 2). La región del Istmo de Tehuantepec registra la zona con mayor potencial para el desarrollo de esta fuente energética. Otros lugares con importantes recursos eólicos son la Península de Yucatán, Zacatecas y la Península de Baja California [10] [11]; esta última presenta índices muy favorables para el aprovechamiento de la energía eólica [12]. (Figura 3).

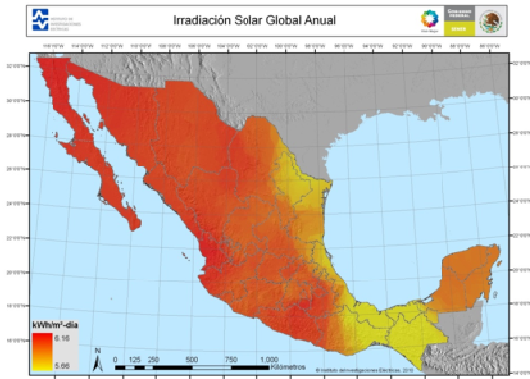
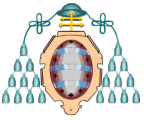


Figura 2: Radiación solar por día en México (kWh/m²)
 Fuente: Instituto de Investigaciones eléctricas



Figura 3: Recurso eólico en México
 Fuente: Estudio de la Energía Solar en México

2.2 Ubicación del Sistema Híbrido

Debido a que en el emplazamiento de estudio convergen mayoritariamente los recursos solares y eólicos, el sistema híbrido se desarrolla bajo estas dos fuentes renovables. La central se ubica en una zona de acceso a la red de gas natural combustible que precisa la turbina de gas [10].

La electricidad producida es directamente inyectada a la red en las condiciones requeridas. (Figura 4)

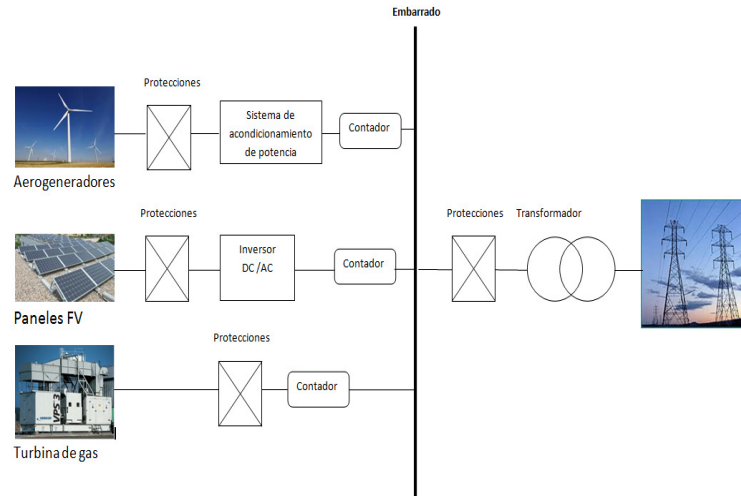


Figura 4: Diagrama Unifilar del Sistema Híbrido

Para la instalación del sistema fotovoltaico, se ha elegido un terreno fundamentalmente llano (Figura 5) (Figura 6). Así mismo en la parcela elegida no existen edificios ni árboles que puedan producir sombras a los paneles, permitiendo en todo momento la generación eléctrica alcance el mayor valor posible.

El subsistema eólico, se instala en una zona de cota más elevada, donde la orografía del terreno es favorable ya que no existen obstáculos que se interpongan en el área de barrido de los aerogeneradores. Se logra de este modo que el flujo de viento sea casi constante.

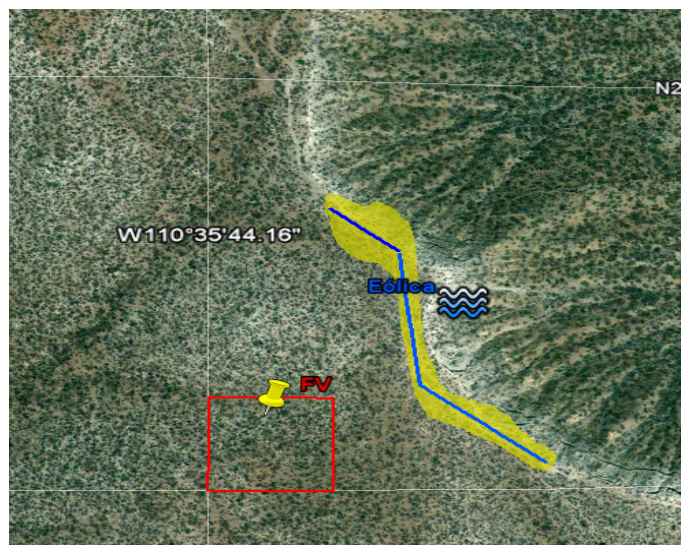


Figura 5: Fotografía aérea del lugar de instalación del sistema híbrido

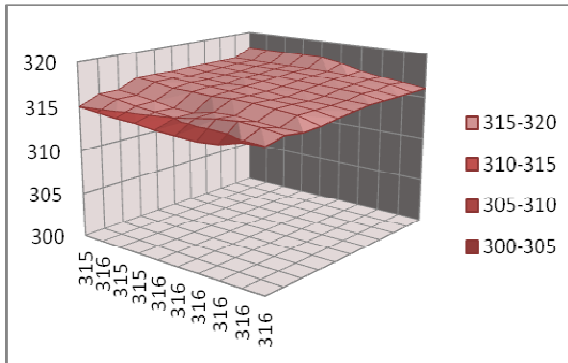
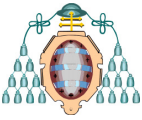


Figura 6: Desnivel del terreno de instalación de la huerta fotovoltaica

2.3 Sistema solar

El sistema solar, propuesto es una instalación fotovoltaica de 1,2 MW que convertirá la energía procedente del Sol en energía eléctrica. Para su diseño, es necesario disponer de información solarimétrica suficientemente fiable; para ello, se procedió a evaluar la disponibilidad del recurso así como la mejor forma de aprovecharlo, esto es, determinar la cantidad y calidad de los paneles fotovoltaicos y establecer su orientación e inclinación para la mejor captación de la radiación solar.

2.3.1 Determinación del máximo aprovechamiento energético

El dimensionado del sistema de captación de energía solar se fundamenta en el conocimiento de la radiación media diaria mensual sobre una superficie inclinada y orientada al sur, con ángulo acimutal cero. Para el máximo aprovechamiento de la energía solar es necesario determinar el ángulo de inclinación que deben presentar los paneles fotovoltaicos, y para ello es preciso calcular un factor de ganancia llamado "R". Este factor permite establecer el ángulo de inclinación óptimo (Ecuación(1)).

$$Gdm(\alpha, \beta) = R \cdot Gdm(0) \quad (1)$$

El valor de $Gdm(0)$ que se toma el del banco de datos del programa SWERA [13].

El factor "R" influye en las tres componentes de la radiación (directa, reflejada y difusa), varía para las distintas épocas del año y debe ser calculado para cada lugar. Para determinar este factor se emplean los métodos de cálculo de "Liu y Jordan" y de "Klein, Duffie y Beckman" [14] (Ecuación 2).

$$R = \left(1 - \frac{D}{Gdm(0)} \cdot R_D\right) + \frac{D}{Gdm(0)} \left(\frac{1 + \cos \lambda}{2}\right) + \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \lambda}{2}\right) \quad (2)$$

El valor de la reflectancia o albedo del suelo (ρ), de la parcela objeto de estudio es de 0,2.

Para determinar el parámetro R_D , se emplea la Ecuación 3.

$$R_D = \frac{\cos(\lambda - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(W_s) + W'_s \cdot \text{sen}(\lambda - \beta) \cdot \text{sen}(\delta)}{\cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(W_s) + W_s \cdot \text{sen}(\lambda) \cdot \text{sen}(\delta)} \quad (3)$$

El parámetro D, puede obtenerse a partir de la Ecuación 4

$$\frac{D}{Gdm(0)} = 1,3903 - 4,0273 \cdot K_T + 5,541 \cdot K_T^2 - 3,108 \cdot K_T^3 \quad (4)$$

donde K_T se define como un "índice de nubosidad" mensual, de tal forma que cuando tiene un valor alto indica tiempo soleado y cuando es bajo, es señal de nubosidad. Este valor se obtiene a partir de la Ecuación 5.

$$K_T = \frac{Gdm(0)}{Gext(0)} \quad (5)$$

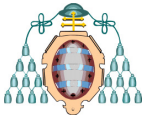
donde:

$$Gext(0) = \frac{24 \cdot 3,6}{\pi} \cdot C_{real} \cdot \left(\cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) + \frac{\pi \cdot W_s}{180} \cdot \text{sen}(\lambda) \cdot \text{sen}(\delta)\right) \quad (6)$$

El factor C_{real} hace referencia al valor de la constante solar diaria normalizada, y se evalúa mediante la Ecuación 7.

$$C_{real} = C \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \text{sen}\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{284 + d}{365}\right)\right) \quad (7)$$

En la Tabla 1, se muestran los resultados del análisis realizado. De ella se obtiene que la máxima captación de la radiación solar será para



un plano orientado al sur e inclinado 26°, esto significa tener una ganancia anual del 5%.

serie (Nps), podemos calcular el número de ramas en paralelo (Npp), a partir de la Ecuación 10:

$$Npp = \frac{Np}{Nps} \quad (10)$$

De esta forma, cada subinstalación estará formada por de 330 paneles fotovoltaicos policristalinos SILIKEN SLK72P6L de 305 Wp, distribuidos en grupos de 22 ramas en paralelo y 15 paneles en serie. La energía generada por cada campo fotovoltaico será acondicionada a partir del inversor del tipo Ingecon Sun 100 de 100kW de potencia nominal.

La instalación cuenta con un total de 3.960 paneles fotovoltaicos y por tanto, tiene una potencia pico total de 1,2078 MW.

2.3.3 Producción energética de la instalación

Para la producción energética del sistema, se han considerado que las pérdidas medias anuales (PR) debidas a las características técnicas del sistema, calidad de los equipos utilizados en el diseño y construcción son del orden del 17,5% ($1-PR_{media}$), en base a ello la producción media del campo solar fotovoltaico (E_D) estará definida por la Ecuación 11.

$$E_D = kWp \cdot Gdm(\alpha, \beta) \cdot PR \quad (11)$$

Por tanto la producción media mensual del sistema se muestra en la Tabla 2.

Mes	PR	E_D [kWh/día m ²]	E_D [kWh/mes m ²]
Enero	0,8666	4.200,01	130.200,27
Febrero	0,8566	5.313,95	148.790,67
Marzo	0,8444	6.670,98	206.800,42
Abril	0,8298	6.902,06	207.061,74
Mayo	0,8174	7.531,29	233.470,01
Junio	0,8046	7.174,04	215.221,25
Julio	0,7971	6.623,39	205.325,00
Agosto	0,7964	6.299,76	195.292,60
Septiembre	0,7989	5.452,40	163.571,91
Octubre	0,8098	5.351,75	165.904,21
Noviembre	0,8309	4.426,89	132.806,58
Diciembre	0,8561	3.828,34	118.678,49
Media	0,8257	5.814,57	176.926,93
Producción anual [kWh]			2.123.123,15

Tabla 2: Producción energética del campo solar fotovoltaico.

Mes	Gdm (0)	R	Gdm (α,β)	Ganancia (%)
Enero	3,80	1,0559	4,013	5,59
Febrero	4,74	1,0836	5,136	8,36
Marzo	5,96	1,0975	6,541	9,75
Abril	6,79	1,0143	6,887	1,43
Mayo	7,36	1,0365	7,629	3,65
Junio	7,30	1,0113	7,382	1,13
Julio	6,71	1,0254	6,880	2,54
Agosto	6,16	1,0632	6,549	6,32
Septiembre	5,55	1,0181	5,651	1,81
Octubre	5,02	1,0900	5,472	9,00
Noviembre	4,15	1,0630	4,411	6,30
Diciembre	3,54	1,0459	3,702	4,59
Media	5,59	1,0504	5,85	5,04

Tabla 1: Análisis solarimétrico para el municipio de la paz.

Una vez obtenida la disponibilidad energética, se procede a realizar los cálculos para estimar el dimensionado del sistema.

2.3.2 Dimensionado de la instalación

Los paneles fotovoltaicos pueden conectarse entre sí en serie y/o en paralelo, con el fin de conseguir los niveles de tensión e intensidad deseados. En este caso, por razones técnicas, se ha elegido dividir la instalación en doce subinstalaciones de 100 kWp cada una. Cada subinstalación está conectada a un inversor trifásico de 100kW de salida.

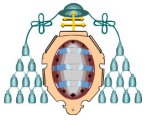
El número de paneles en cada subinstalación (Np), se calcula a partir de la Ecuación 8:

$$Np = \frac{Pi}{Pmp} \quad (8)$$

El número de paneles en serie (Nps) está condicionado por la tensión de entrada del inversor, por lo que se determina a partir de Ecuación 9.

$$Nps = \frac{Vinv}{Vmp} \quad (9)$$

Teniendo en cuenta en número total de paneles (Np) y el número de ellos que forman una



2.4 Sistema eólico

El sistema eólico, se ha optado por una instalación de 1,8 MW de potencia. Para realizar las estimaciones energéticas cualitativas es necesario disponer de la información cartográfica del lugar así como de la velocidad del viento y las direcciones dominantes. En este sentido, la Figura 5 muestra la zona más idónea del municipio de La Paz para el desarrollo del sistema eólico. Esta zona se encuentra sobre una pequeña colina, y a su alrededor no existen obstáculos ni montañas que afecten apreciablemente el recurso eólico. [15]

Para dimensionar el sistema eólico partimos de que la energía cinética captada por los aerogeneradores es transformada en energía eléctrica la cual es vertida a la red eléctrica mediante un sistema de acondicionamiento de potencia [16]. Al igual que la solar, esta instalación requiere de sistemas de seguridad y contadores.

2.4.1 Determinación del máximo aprovechamiento

La máxima potencia aprovechada del viento, por cada uno de los aerogeneradores, viene dada por la Ecuación (12).

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \cdot C_p \quad (12)$$

La velocidad media anual del viento en el municipio de La Paz según datos de la CONAGUA es de 5,7 m/s [17], este valor coincide con el registrado por el Laboratorio de Energías Renovables de EEUU, el cual clasifica este recurso como de potencial moderado. Estas medidas se hacen a una altura del suelo de 7 m. A 50 m, la velocidad se calcula a partir de la *Ley Potencial para Perfil Vertical de Velocidades*, expresada en la Ecuación (13).

$$v = \left(\frac{H}{H_o} \right)^\alpha v_o \quad (13)$$

El valor de α se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{hg}{ho}\right)} - \frac{0,0081}{1-0,0881} \cdot \ln\left(\frac{Vo}{6}\right) \quad (14)$$

Para ho se toma 0,5, ya que se trata de una zona con arbustos y pocos edificios. Sustituyendo estos valores en (12) resulta que α vale 0,28.

La Tabla 3 y el Gráfico 1 recogen las velocidades mensuales medias del viento en el municipio de La Paz a 7 y 50 m de altura, respectivamente.

Mes	Velocidad media 7m	Velocidad media 50m.
Enero	5,60	9,71
Febrero	5,90	10,23
Marzo	6,10	10,58
Abril	6,20	10,75
Mayo	6,20	10,75
Junio	6,10	10,58
Julio	5,90	10,23
Agosto	5,80	10,06
Septiembre	5,30	9,19
Octubre	5,20	9,02
Noviembre	4,90	8,50
Diciembre	5,50	9,54
Media	5,73	9,93

Tabla 3: Velocidad media del viento.

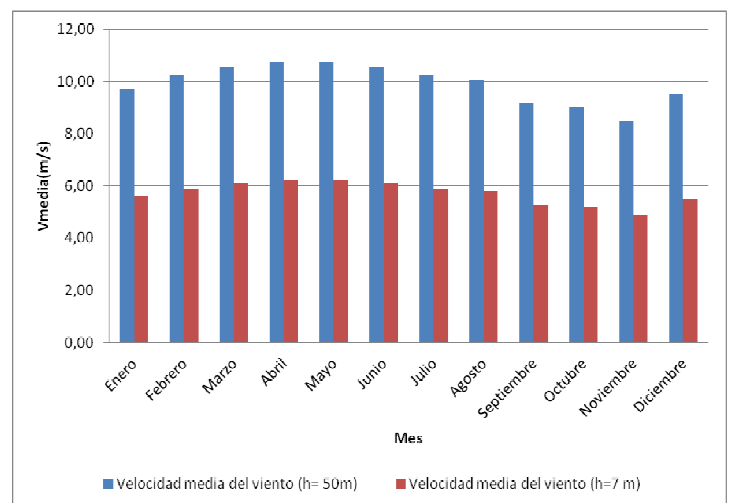
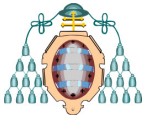


Gráfico 1: Comparación de velocidades medias del viento a 7 y 50m de altura



En el perfil de velocidades del *Gráfico 2* se puede observar que a 50 metros de altura sobre el nivel del suelo, la velocidad se sitúa en torno a los 10 m/s, tal y como se ha calculado anteriormente. (Tabla 3 y Gráfico 1)

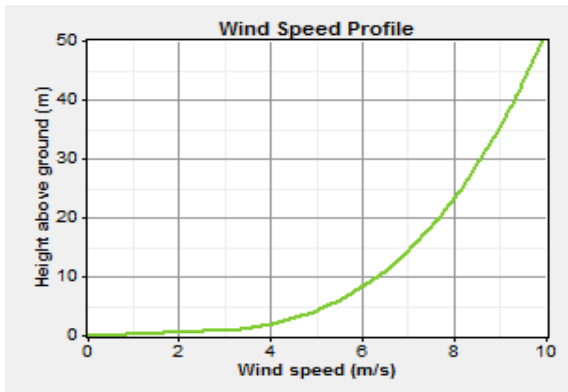


Gráfico 2: Perfil de velocidades de viento

La distribución de velocidades de viento (Distribución de Weibull) presenta una distribución que se muestra en el Gráfico 3. A partir de ella se determinan los valores de 6,45 m/s para el factor de escala (c) y de 1,98 para el factor de forma (k).

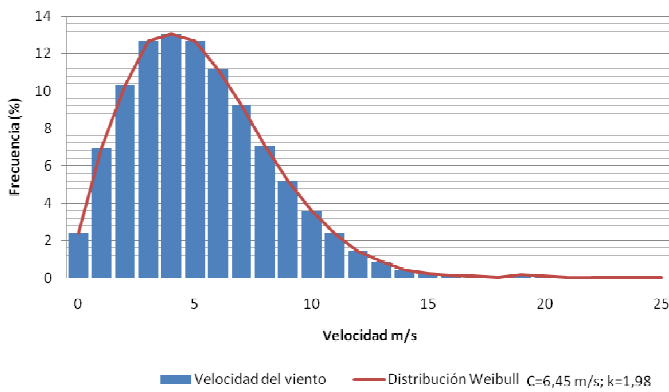


Gráfico 3: Distribución de Weibull.

El valor del coeficiente de potencia (C_p) lo proporciona el fabricante en función de la velocidad y para una densidad del aire de $1,225 \text{ kg/m}^3$. Los C_p para cada una de las velocidades a 50 metros de altura, se determina a partir de los datos proporcionados por el fabricante. (Tabla 4)

Mes	Velocidad media a 50 m.	$C_p (V_{50})$
Enero	9,71	0,48
Febrero	10,23	0,46
Marzo	10,58	0,44
Abril	10,75	0,43
Mayo	10,75	0,43
Junio	10,58	0,44
Julio	10,23	0,46
Agosto	10,06	0,47
Septiembre	9,19	0,49
Octubre	9,02	0,50
Noviembre	8,50	0,50
Diciembre	9,54	0,48

Tabla 4: Valores de C_p a la velocidad del viento a la altura del buje.

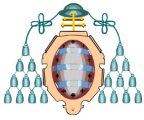
Con estos datos se calcula la potencia eólica aprovechable media por cada uno de los aerogeneradores eólicos para cada mes del año (Tabla 5).

Mes	Potencia eólica aprovechable media (kW)
Enero	235,35
Febrero	262,30
Marzo	276,55
Abril	283,57
Mayo	283,57
Junio	276,55
Julio	262,30
Agosto	254,76
Septiembre	206,02
Octubre	196,58
Noviembre	164,68
Diciembre	225,34
Media	243,97

Tabla 5: Potencia eólica aprovechable

2.4.2 Dimensionado de la instalación

Dado que el sistema eólico consta de 1,8 MW, se optó por la instalación de 6 aerogeneradores E33 Enercon, de 330 kW de



potencia unitaria, cuya curva de potencia se muestra en el Gráfico 4.

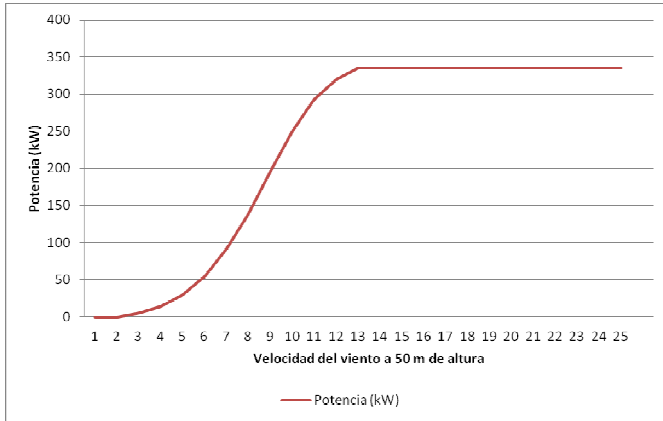


Gráfico 4: Curva de potencia de instalación eólica.

El aerogenerador seleccionado tiene un diámetro de 33,4m y las alturas de buje por el fabricante son de 37, 44, 49, 50 metros de altura. En este proyecto se ha elegido una torre de 50 metros, debido a que la velocidad del viento aumenta con la altura.

De la base de datos de WINDFINDER [18], se obtienen las direcciones predominantes del viento a lo largo de un año. Según se puede observar en la rosa de vientos, las direcciones de mayor frecuencia del viento son NNW y S. Las Mayores producciones energéticas de los aerogeneradores tendrán lugar cuando estén orientados en estas direcciones.

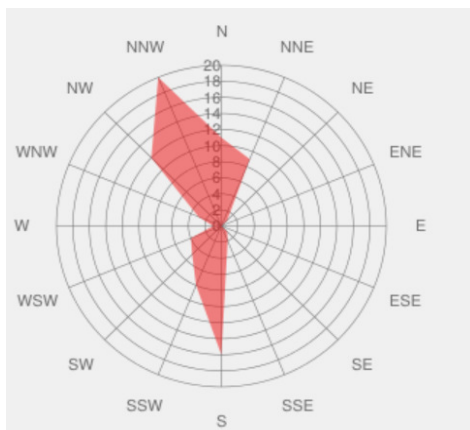


Figura 7: Distribución direcciones de viento (%)

Teniendo en cuenta las direcciones predominantes de viento (NNW y S) y la

orientación de la colina donde se instalará el subsistema eólico, se ha optado por situar los aerogeneradores siguiendo una alineación noroeste (NNW)-sureste (SSE), con una separación mínima de unos 33,4 m, que es el diámetro del rotor.

2.4.3 Producción energética

La producción energética dependerá de la disponibilidad del recurso eólico y el coeficiente de potencia (C_p). Para realizar un cálculo exhaustivo y preciso de la producción de un aerogenerador es necesario realizar medidas que nos permitan caracterizar el comportamiento del viento en el emplazamiento con exactitud y precisión.

Para determinar la producción energética de cada aerogenerador, se ha utilizado el sistema de simulación Homer, que obtiene la producción considerando el recurso eólico a la altura del buje y la curva de potencia del aerogenerador tipo seleccionado.

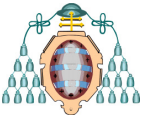
El programa Homer proporciona una producción bruta anual del conjunto de aerogeneradores de 9.905.611 kWh, teniendo en cuenta únicamente los efectos topográficos y la densidad del aire.

Producción	kWh/año
Aerogeneradores	9.905.611

Tabla 6: Producción anual del sistema solar y eólica obtenidas a partir del programa Homer.

Debe tenerse en cuenta que la producción anterior no es la producción neta del sistema eólico, para obtener esta última es preciso tener en cuenta las pérdidas por efecto estela (interferencia entre aerogeneradores) que se consideran del orden de un 5%, así como una serie de coeficientes que cuantifiquen una serie de elementos que, en principio y en cierta medida, son dependientes del emplazamiento escogido. Estos elementos y sus coeficientes son los siguientes:

- Disponibilidad: 97%
- Suciedad y hielo en las palas: 99%
- Pérdidas eléctricas: 97%
- Mantenimiento: 99,8%



- Histéresis del viento debidas a las paradas y arranques de las máquinas de forma automática por el sistema de control: 99,8%

Considerando todas estas perdidas, se obtiene un factor medio del 97,93%.

Por tanto una vez consideradas todas las pérdidas, se concluye que la producción anual del sistema eólico es de **9.700.565 kWh**.

2.5 Turbina de gas

El gas es uno de los hidrocarburos con fuerte presencia en el sector energético mexicano. La producción, de gas mantuvo un índice de crecimiento constante en el periodo del 2002 al 2009, año en el que alcanzó unos 6.500 millones de pies cúbicos, la máxima. (Gráfico 5)

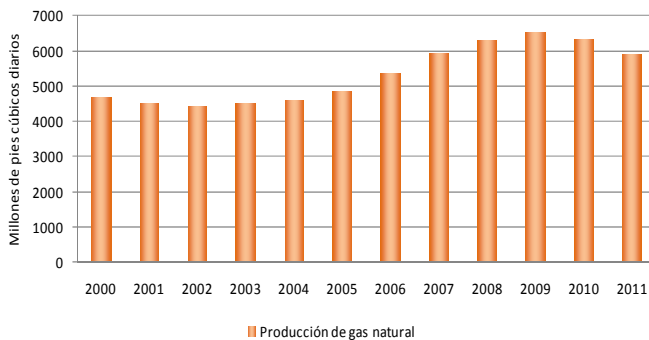


Gráfico 5: Evolución de la producción de gas natural seco en México

Es por ello que el gobierno mexicano favorece las tecnologías que cuenten con instalaciones de gas. En este trabajo se ha optado porque el sistema de apoyo de la central solar-eólica considerada sea una turbina de gas, que funcionaría cuando la electricidad resultante sea inferior a 600 kW, hasta completar este valor, garantizando en todo momento este suministro mínimo constante de vertido a la red.

La turbina de gas seleccionada Capstone C600, tiene una potencia eléctrica nominal de salida de 600 kW y funcionará siempre como un sistema de apoyo a las fuentes de energía renovable.

La eficiencia eléctrica de la turbina, proporcionada por el fabricante es de un 33%, un

valor relativamente alto, comparándolo con el de las turbinas de este rango de potencias disponibles en el mercado (Gráfico 6).

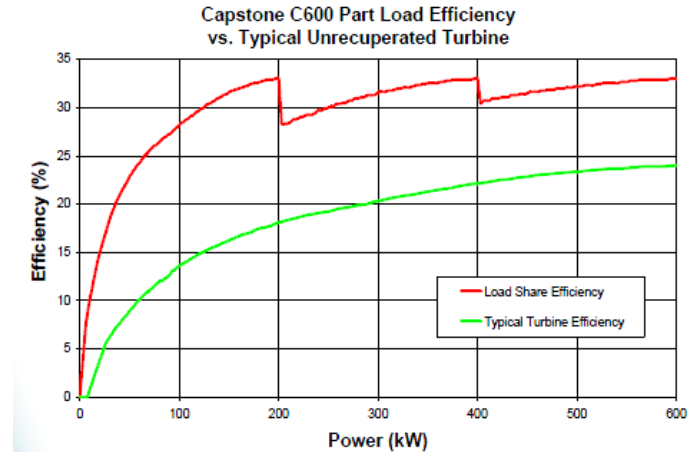


Gráfico 6: Curva de eficiencia eléctrica de la turbina Capstone C600 en función de la carga, comparada con una curva de eficiencia típica de turbinas de la misma potencia disponibles en el mercado.

Las características del gas natural que utilizará la turbina seleccionada se recogen en la Tabla 7.

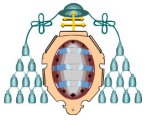
Gas Natural HHV (high heating value)	30,7-47,5 MJ/m ³
Presión de entrada	517-552 kPa
Flujo de combustible HHV	7200 MJ/h
Tasa neta de calor LHV (low heating value)	10,9 MJ/kWh

Tabla 7: Características del gas natural

La potencia real entregada por la turbina de gas depende de su rendimiento así como del flujo y poder calorífico inferior del combustible, de acuerdo con la ecuación 15:

$$P_{TG} = g \cdot PCI \cdot \eta \quad (15)$$

El consumo horario de combustible, dependerá de la potencia real que la turbina proporciona, el rendimiento en función de esa potencia (Gráfico 6) y del PCI del combustible. En la Tabla 8 se indican los consumos de gas natural (GN) para distintas potencias de vertido a la Red Eléctrica de la turbina CAPSTONE C600.



Potencia real entregada por la Turbina Gas (kW)	Consumo de GN [(kg/s)*10 ⁻³]
150	10,4
250	17,8
350	23,4
450	30,6
550	35,7

Tabla 8: Consumo de combustible en función de la potencia entregada de la turbina

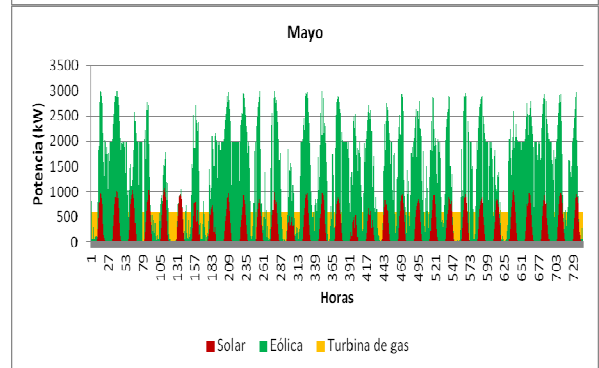
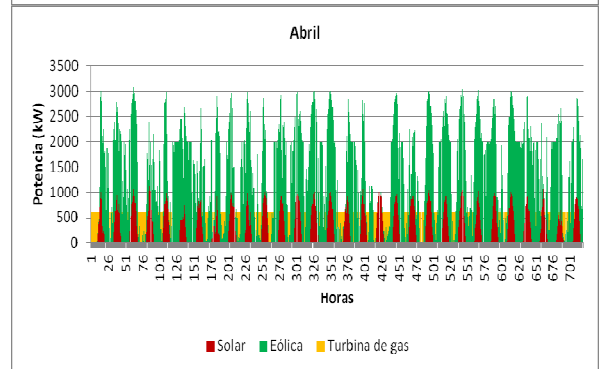
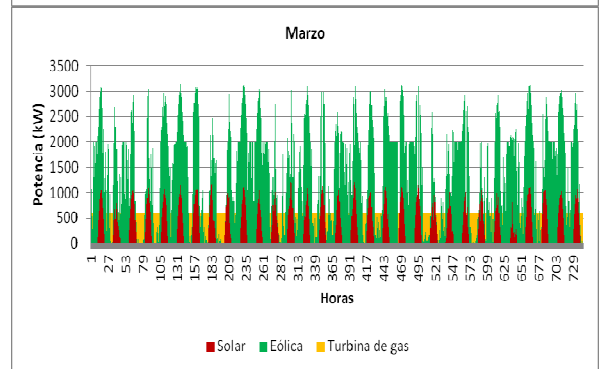
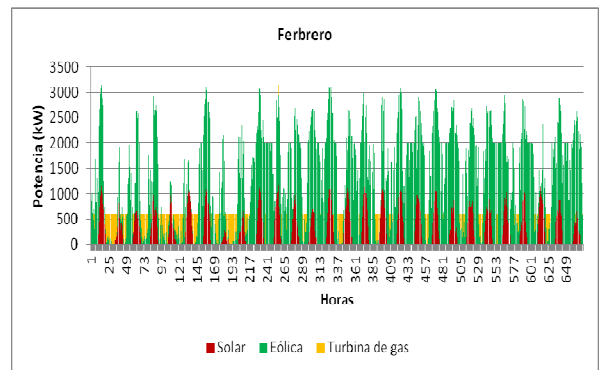
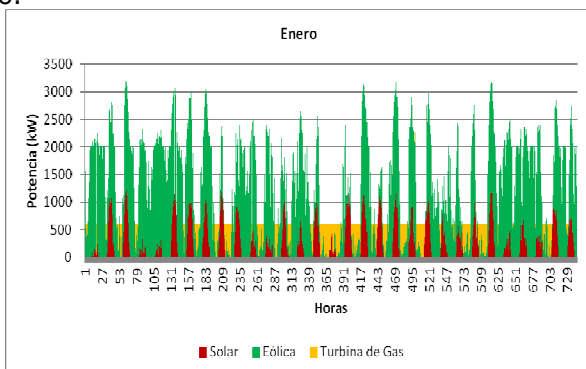
Para los cálculos, se ha tomado un valor del poder calorífico inferior del gas natural de 46738 kJ/kg [19].

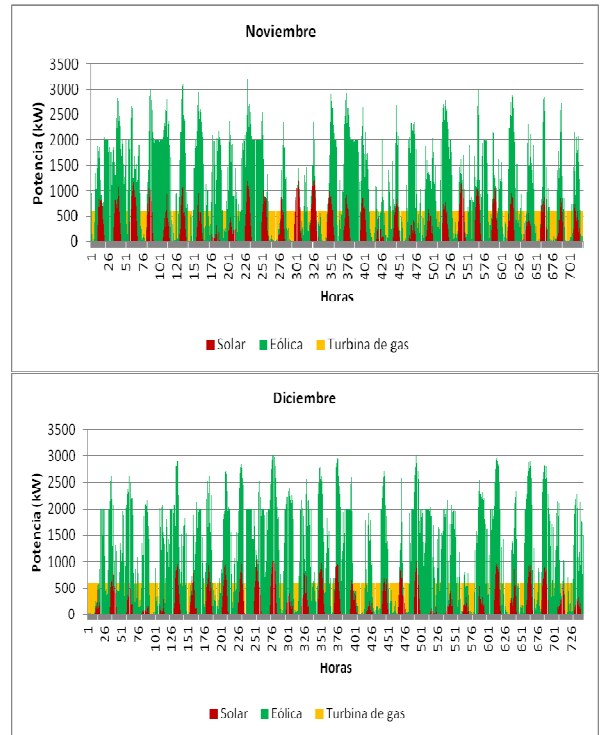
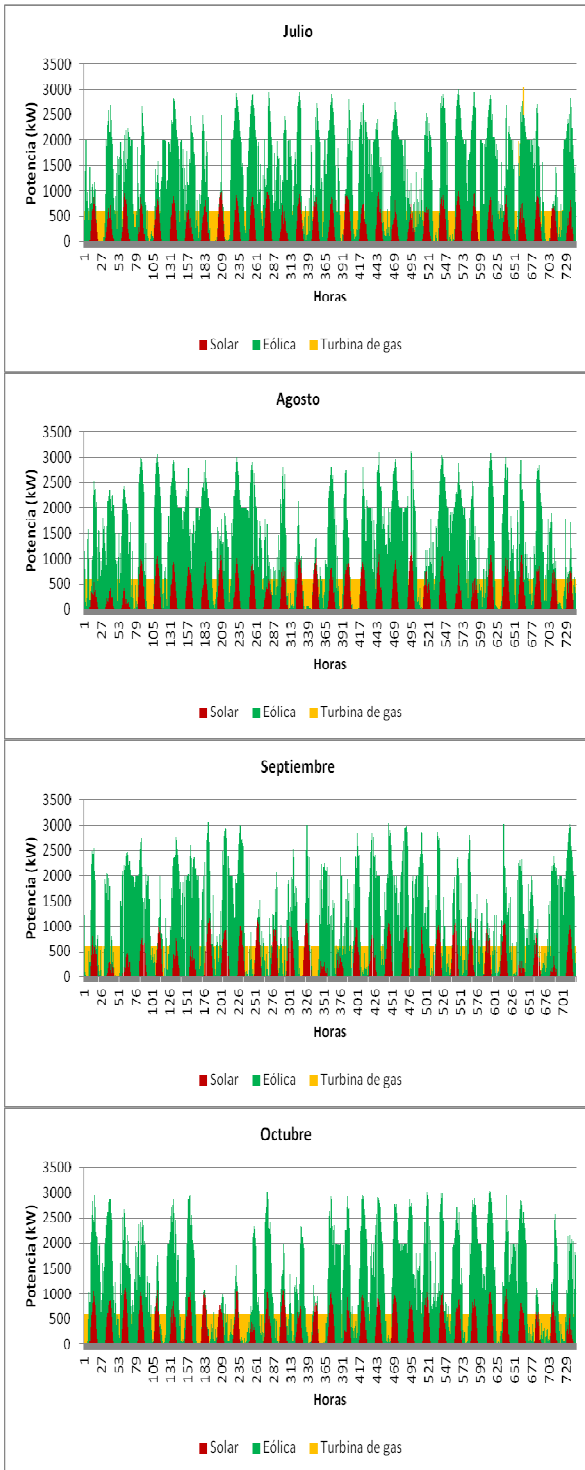
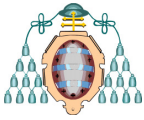
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del sistema híbrido planteado en el presente trabajo, se realizó a partir del sistema de simulación HOMER “Modelo de Optimización para Sistemas Híbridos Eléctricos con Base en Energías Renovables”, desarrollado por NREL (National Renewable Energies Laboratory, EEUU).

A partir del análisis con HOMER podemos estimar la producción anual horaria de los sistemas renovables y a partir de ella, definir el funcionamiento de la turbina de gas.

En los siguientes diagramas se observa la suma de producciones horarias de cada uno de los componentes del sistema híbrido de cada mes del año.

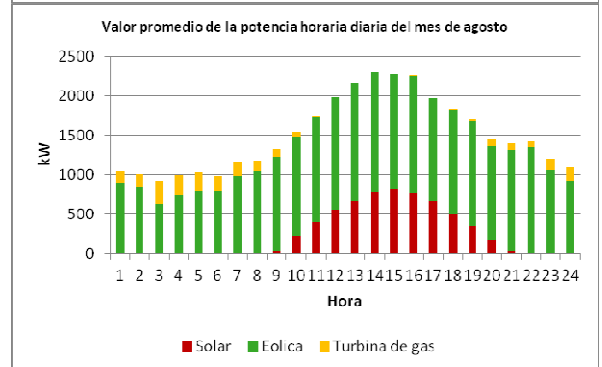
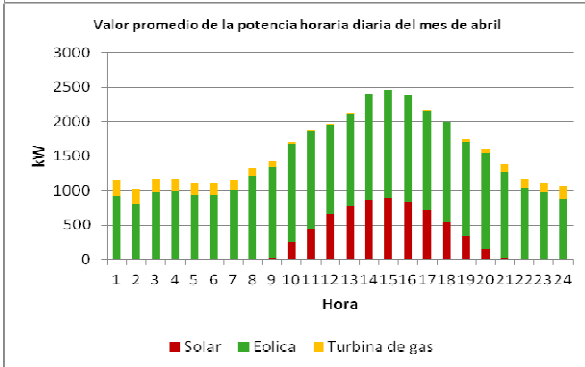
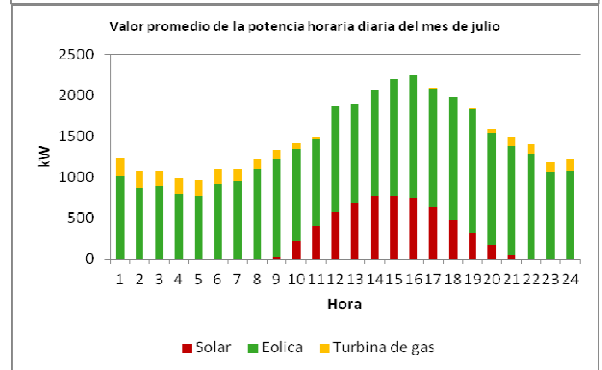
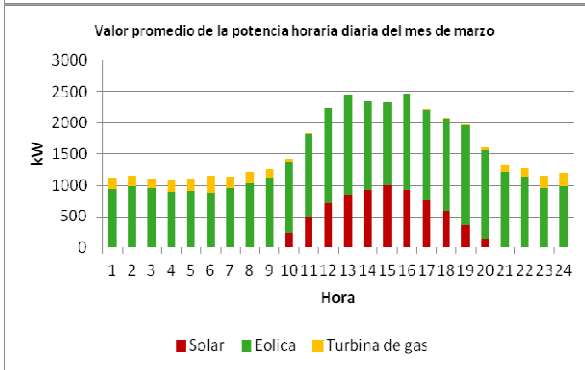
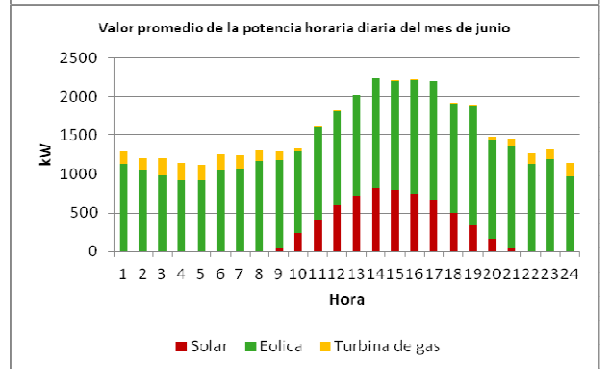
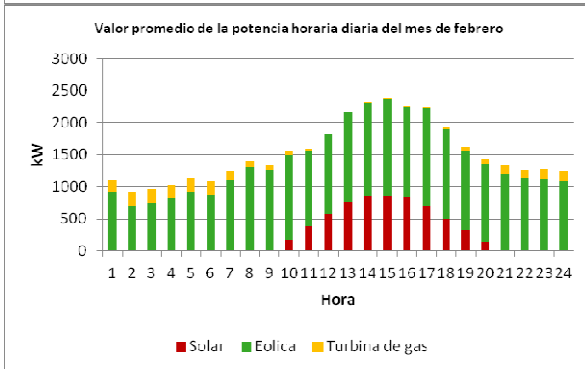
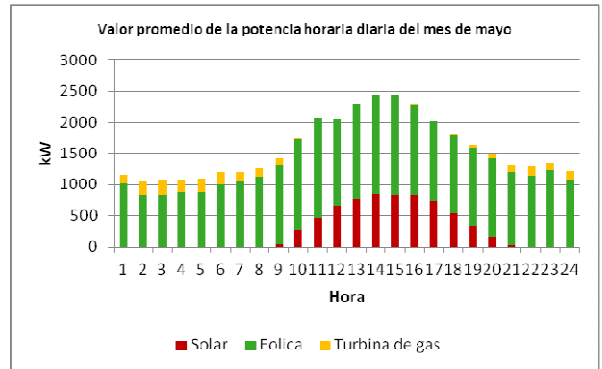
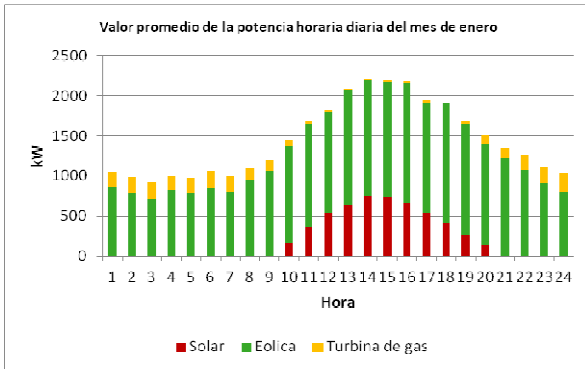
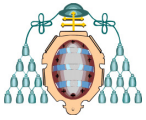


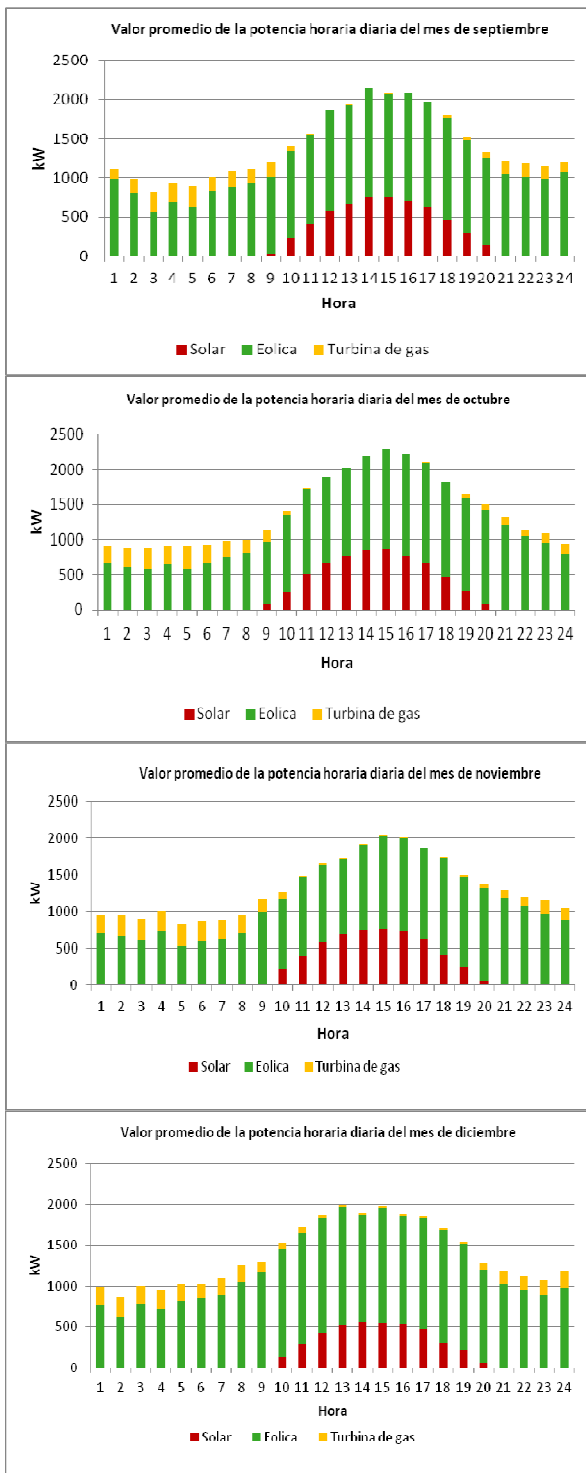
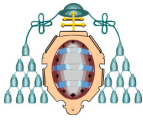


Gráficos 7: Producción renovable horaria de cada mes a lo largo del año.

En lo gráficos anteriores se puede observar que la potencia anual generada por las fuentes renovables a lo largo del año presentan una gran participación. Así mismo permiten garantizar un vertido a la red mínimo de 600 kW, dando prioridad absoluta a las energías renovables, de forma que, cuando la suma de la producción renovable sea inferior a 600 kW, la turbina de gas entraría en funcionamiento.

Del valor promedio de la potencia horaria diaria de cada mes, del sistema híbrido, se concluye que la turbina de gas tiene una participación mínima cuando existe radiación solar. Se observa también que la variación de la producción eléctrica renovable a lo largo del año, siendo mayor en los meses de verano-primavera y menor en los meses de invierno-otoño.





Gráficos 8: Valores promedio de la potencia horaria diaria de cada mes.

CONCLUSIONES

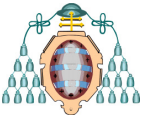
La disminución de los costes de las tecnologías renovables en los últimos años, las han convertido en más competitivas respecto a las energías tradicionales, renovándose el interés por su implantación. Es por ello que en México se han implantado leyes, como la del Aprovechamiento de las Energías Renovables y del Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), que potencian el desarrollo de estas energías inagotables.

La implementación de la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables, permite beneficios económicos sociales y ambientales, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Reducción de costes y riesgos económicos de la energía
- Disminución la dependencia de combustibles fósiles y mejorar el "mix energético".
- Aumento de la seguridad en el abastecimiento de energía
- Mitigación el cambio climático, disminuyendo las emisiones de gases efecto invernadero.
- Reducción de impactos del sector energético sobre la salud y el medio ambiente, por la menor emisión de gases y partículas.
- Contribución a la protección de bosques y selvas.

Actualmente el sector de las energías renovables en México se encuentra en una fase inicial y aunque, el contexto normativo e institucional es mucho más favorable que hace unos años, aún quedan barreras por superar que imposibilitan el despegue definitivo de este sector.

En México la potencia FV instalada en 2007 era de 18,5 MW, generando un promedio de



0,032TJ/año [20], y su finalidad primordial era para la electrificación rural. Los sistemas fotovoltaicos en conexión a red cuestan unos 8.000 US\$/kW, y los aislados el doble [21]. Los costes de electricidad generada son todavía demasiado altos para poder ser competitivos con otras tecnologías, entre 0,12 y 0,18 US\$/kWh para centrales de concentración solar y entre 0,26 y 0,36 US\$/kWh para sistemas fotovoltaicos en conexión a red eléctrica en México, aunque se espera que estos costes disminuyan significativamente en el transcurso de los próximos años.

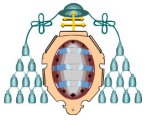
En cuanto a la energía eólica, México contaba en 2007, con 170 MW de capacidad eólica instalada [22]. Teniendo en cuenta que la tecnología de las turbinas eólicas en el transcurso de las últimas dos décadas ha avanzado radicalmente, reduciéndose sus costes hasta hacerse competitivos las tecnologías convencionales de generación de electricidad [23], en contextos geográficos favorables. Los sistemas eólicos de generación eléctrica tienen unos costes de inversión del orden de 1.700 US\$/kW y unos costes de generación de unos 0,05 US\$/kWh, que son muy inferiores a los FV.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, hasta el completo desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica, podrían reemplazarse los kW instalados de energía solar por energía eólica, ya que por otro lado, la energía eólica también puede generar durante un mayor número de horas a lo largo del día, quedando la energía solar fotovoltaica limitada únicamente a las horas de irradiación solar.

4 NOMENCLATURA

G_{dm}(0) Radiación solar media mensual sobre superficie horizontal [kWh/m²]
 G_{ext}(0) Radiación total media diaria mensual extraterrestre [kWh/m²]
 G_{dm}(α,β): Radiación solar media mensual

sobre superficie inclinada (α orientación y β inclinación) [kWh/m²]
 λ: Latitud geográfica, N24°07'
 R_D: Valor de radiación para superficies inclinadas al sur
 D: Radiación difusa
 ρ: Reflectancia del suelo o albedo
 β: Inclinación de los paneles
 δ: Declinación solar.
 W_s: Ángulo solar horario.
 W'_s: Valor mínimo entre W_s y W
 W: Ángulo de puesta de sol
 K_T: Índice de nubosidad
 C: Constante solar, de valor 1353 W/m²
 d: Número de orden del día tomando d=1 para el 1 de Enero (día juliano)
 C_{real}: Constante solar diaria normalizada
 P_i: Potencia de cada subinstalación
 P_{mp}: Potencia pico del panel fotovoltaico
 V_{inv}: Tensión de entrada del inversor
 V_{mp}: Tensión máxima del panel fotovoltaico
 N_p: Número de paneles en cada subinstalación
 N_{ps}: Número de paneles en serie
 N_{pp}: Número de paneles en paralelo
 E_D: producción media del campo solar fotovoltaico
 PR: Factor de evaluación de pérdidas debidas a características técnicas del sistema fotovoltaico
 S: Área de barrido del aerogenerador (876m²)
 ρ: Densidad del aire (1,225 kg/m³)
 V: Velocidad del viento a la altura del buje del aerogenerador
 C_p: Coeficiente de potencia (dato proporcionado por fabricante)
 H: Altura a medir
 H_o: Altura donde a la que fueron tomadas las medidas
 V_o: Velocidad media del viento
 a: Coeficiente de rugosidad superficial
 hg: Altura media geométrica entre las distintas alturas, siendo $hg = \sqrt{H_o \cdot H}$
 h_o: Longitud de rugosidad estimada del terreno (m)
 C_p: Coeficiente de potencia



g: Consumo horario de combustible [kg/h]
PCI: Poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]
 η : Rendimiento de la turbina de gas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera dar las gracias al Profesor Dr. D. Jorge Xiberta Bernat, Catedrático, de Máquinas y Motores Térmicos del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo, por ofrecerme la posibilidad de elaborar este trabajo y haberme ayudado con sus notas y correcciones.

En segundo lugar, doy las gracias a la co-tutora Dña. Eunice Villacaña Ortiz, por la ayuda prestada a lo largo de la elaboración de este trabajo.

Y por último, quisiera dar las gracias a mis padres y a toda mi familia por su apoyo incondicional.

REFERENCIAS

- [1] Conteo Nacional de Población 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Mayo 2012.
- [2] Secretaría de Energía (SENER) Balance Nacional de Energía 2007. México.
- [3] Cancino- Solórzano Y. Electricity Sector in Mexico: Current status. Contribution of renewable energy sources. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 1, January 2010, Pages 454-461, ISSN 1364-0321, 10.1016/j.rser.2009.07.022.
- [4] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Censo de Población y Vivienda 2010

[5] Mapa de recurso solar. Sistema de Información Geográfica para las Energías renovables en México (SIGER). Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

[6] González E., Beltrán L., Troyo E., Ortega A., Potencial de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México. Interciencia, ISSN 0378-1844, Abril 2006, Venezuela.

[7] Saldaña R., Miranda U., Estudio de los potenciales bioenergético, eólico, minihidráulica y solar en México. División de energías alternas. Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Marzo 2005. México.

[8] Lopez G.J. Cuantificación de energía de una planta maremotriz. Tidal Power Plant Energy Estimation. Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol.XI. Núm.2. 2010 233-245. ISSN 1405-7743 FI-UNAM.

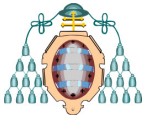
[9] Estrada C. Almanza R., Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal en la República Mexicana. Serie Investigación y Desarrollo. Instituto de Ingeniería de la UNAM. ISBN 970-32-0196-2. Mayo 2005. México.

[10] Villicaña O. E. Trabajo de Investigación. Estudio de la Energía Solar en México, Departamento de Energía, Universidad de Oviedo. Septiembre 2009.

[11] Cancino S.Y, Gutiérrez T.A., Xiberta-B.J. Current state of wind energy in Mexico, achievements and prospective. , Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 8, October 2011, Pages 3552-3557, ISSN 1364-0321, 10.1016/j.rser.2011.05.009.

[12] U.S. Department of Energy National Renewable Energy Laboratory (NREL). Meteorological Station with Wind data. Diciembre 2002.

[13] Solar and Wind Energy Resource Assesment (SWERA).



[14] Noyón N.N. Huerta fotovoltaica de 1,2 MW, con seguimiento solar y conexión a red, en Sevilla. Proyecto Fin de Carrera, Departamento de Energía, Universidad de Oviedo. Julio 2008.

[15] Cancino S.Y, Gutiérrez T.A., Xiberta-B.J. Analytical methods for wind persistence: Their application in assessing the best site for a wind farm in the State of Veracruz Mexico. Renewable Energy, Volume 35, Issue 12, December 2010, Pages 2844-2852, ISSN 0960-1481, 10.1016/j.renene.2010.05.008.

[16] Cancino S.Y, Gutiérrez T.A., Xiberta-B.J. Statical analysis o wind power in the region of Veracruz (México).Renewable Energy, Volume 34, Issue 6, June 2009, Pages 1628-1634, ISSN 0960-1481, 10.1016/j.renene.2008.11.0.018.

[17] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Normales climatológicas La Paz, BCS. Periodo 1987-2000.

[18] Rosa de vientos. Estadística meteorológica y eólica basada en observaciones registradas diariamente en el periodo 5/2001-5/2012 en La Paz Airport. www.windfinder.com (Acceso mayo 2012)

[19] Tabla de poderes caloríficos típicos de combustibles gaseosos y líquidos. Comisión Nacional para Uso Eficiente de la Energía (CONAE). www.conae.gob.mx (Acceso marzo 2012)

[20] Balance Nacional de Energía 2007.

[21] Cifras promedio propuestas por el Banco Mundial, 2008. Ver también CONUEE/ GTZ, 2009.

[22] Balance Nacional de Energía 2007 y Reforma 2009.

[23] Coste promedio de turbinas obtenido de Banco Mundial, 2008. Coste de electricidad: REN21, 2009.