

Evaluación energética comparativa de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de baja potencia para la electrificación de una vivienda rural

Comparative energy evaluation of a hybrid wind-photovoltaic system of low power for the electrification of rural housing

Karina Pacco

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann

RESUMEN

El presente trabajo está basado en la tesis titulada: "Evaluación energética comparativa de un Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de baja potencia para la electrificación de una vivienda rural" realizada durante el periodo Febrero-Marzo 2010, tiene por finalidad evaluar los recursos eólico y solar de la Provincia de Tacna y evaluar comparativamente un sistema eólico-fotovoltaico con sus sub-sistemas para la electrificación de una vivienda rural ubicada en la Provincia de Tacna. En la investigación se utilizó un aerogenerador Rutland WG-910 y un panel fotovoltaico Siemens, se construyeron instrumentos como el divisor de voltaje y el circuito fotoeléctrico; se desarrolló un software-plantilla para el estudio detallado de los recursos solar y eólico, los sistemas energéticos y los datos meteorológicos; así también se muestra los detalles de la tecnología del sistema híbrido eólico-fotovoltaico de forma que el sistema híbrido para una vivienda que se proyecte en el futuro inmediato sea más eficiente y económica.

Los subsistemas que integran el sistema híbrido eólico-fotovoltaico son generadores domésticos de electricidad económicos, que se instalan a bajo costo y ayudan a liberar a los ciudadanos de la dependencia de las compañías de suministro eléctrico y del petróleo. Los resultados obtenidos de la evaluación indican la posibilidad de un uso mayor de la energía solar y la no viabilidad de la energía eólica para la Provincia de Tacna, por lo tanto si se hiciera una reconversión energética hacia energías renovables; la energía solar podría ser el nuevo vector energético sostenible de la Provincia de Tacna para su alto progreso material y su desarrollo sostenible. Así también se analizó la viabilidad técnico-económica de la producción de cada subsistema y se utilizó un método basado en evaluar la fiabilidad de un sistema autónomo mediante el concepto de Probabilidad de Pérdida de Carga, generalmente denominada LLP (Loss of Load Probability).

En la actualidad, a escala mundial, la energía consumida por el hombre proviene de los combustibles fósiles cuya utilización masiva conduce al agotamiento de las reservas y supone a la vez un real peligro para el medio ambiente, manifestándose principalmente a través del calentamiento global de la tierra y la acidificación del ciclo del agua. Es importante hacer la reconversión energética hacia energías independientes del petróleo y limpias para romper la dependencia económica de los proveedores de combustibles fósiles y apostar por un desarrollo sostenible.

El objetivo de la presente investigación es realizar la evaluación comparativa de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de baja potencia para la electrificación de una vivienda rural" ubicada en la provincia de Tacna, para ello es necesario analizar los parámetros meteorológicos de la intensidad del viento y la radiación solar local, así como el análisis energético y posibilidades de uso del sistema híbrido eólico-fotovoltaico, considerándose como una alternativa para el sector energético. A lo largo de la recolección de datos y elaboración del informe de tesis, se desarrolló un software para el estudio detallado de los recursos solar y eólico, los sistemas energéticos y los datos meteorológicos.

Descriptores: *Shefv, energía eólica, energía solar, software plantilla, software estadístico, LLP, Tacna, divisor de voltaje, circuito fotoeléctrico, detalles tecnológicos, Rutland WG-910, Siemens, recurso eólico, recurso solar.*

ABSTRACT

This work is based on the thesis titled "Comparative Energy evaluation of a hybrid wind-photovoltaic system of low power for the electrification of rural housing" conducted during February-March 2010, aims to evaluate wind and solar resources of the province of Tacna and benchmark wind-photovoltaic system with its sub-systems for the electrification of a rural home located in the province of Tacna. The research used a wind turbine Rutland WG-910 and a Siemens solar panel, built instruments such as the voltage divider and the circuit Photoelectric developed a software template for the detailed study of solar and wind resources, energy systems and meteorological data, and also shows details of the technology of wind-photovoltaic hybrid system so that the hybrid system for housing projected into the near future more efficiently and economically.

The subsystems that make up the hybrid wind-photovoltaic are home generators of economic power that are installed at low cost and help to free the citizens of the dependence of the power companies and oil. The results of the evaluation indicate the possibility of greater use of solar energy and non-viability of wind power for the province of Tacna, so if you make a reconversion to renewable energy, solar energy could be the new sustainable energy vector in the province of Tacna to its high material progress and sustainable development. Thus we also analyzed the technical and economic feasibility of production of each subsystem and used a method based on evaluating the reliability of an autonomous system using the concept of Loss of Load Probability, usually referred LLP.

At present, on a global scale, the power consumed by humans comes from fossil fuels whose massive use leads depletion of reserves and involve both a real danger to the environment, manifesting mainly through the global warming of the earth and the acidification of the water cycle. It is important to energy conversion to energy independent, clean oil to break the economic dependence on suppliers of fossil fuels and go for sustainable development.

The objective of this research is to make a "Comparative Energy evaluation of a hybrid wind-photovoltaic system of low power for the electrification of rural housing" located in the province of Tacna, for it is necessary to analyze the meteorological parameters of wind speed and local solar radiation and energy analysis and possible applications of wind-photovoltaic hybrid system, considered as an alternative to the energy sector. Throughout the collection of data and elaboration of the thesis report, it developed a software detailed study of solar and wind resources, energy systems and meteorological data.

Keywords: *Shefv, wind energy, solar energy, template software, statistical software, LLP, Tacna, voltage divider, photoelectric circuit, technology details, Rutland WG-910, Siemens, wind resources, solar resources.*

INTRODUCCIÓN

En nuestro país existen 6 millones 400 mil 131 viviendas particulares con ocupantes presentes de los cuales; 4 millones 741 mil 730 disponen de alumbrado eléctrico conectado a la red pública, mientras que un millón 658 mil 401 viviendas aún no disponen de este servicio (INEI - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2007). En cifras relativas, el 74,1% de las viviendas dispone de este servicio, que significa un importante crecimiento en relación a 1993, que fue de 54,9%. En cambio, las viviendas que no disponen del servicio de alumbrado eléctrico han disminuido de 45,1% en 1993 a 25,9% en el 2007; siendo el principal motivo la orografía tan variada y la dispersión de las poblaciones rurales, haciendo que el costo de tendido de redes eléctricas sea alto, por lo que se hace necesario buscar alternativas de electrificación con modelos diferentes. En la presente investigación se realiza el estudio de los recursos eólico y solar del Distrito de Tacna, con el fin de generar energía eléctrica, para

mejorar la calidad de vida de la población del Distrito de Tacna, mostrando los beneficios que se podrían obtener de la energía eólica y solar; y las posibilidades de convertirse en el vector energético sostenible para la Región Tacna.

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Vientos de Tacna

El Informe de prácticas pre-profesionales "Vientos de Tacna", ha sido realizada tomando como base la data aportada de los años 2000-Abril 2005 de la Región Tacna de la Red de Monitoreo SENAMHI Tacna-Moquegua, realizada en el periodo correspondiente de Noviembre 2004 a Agosto 2005.

Atlas de Energía Solar del Perú

Este libro ha sido realizado tomando como base lo aportado por la base de datos de irradiación solar proveniente de estaciones convencionales y automáticas instaladas a nivel nacional del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), siendo elaborada a través del convenio

Proyecto PER/98/G31 entre el SENAMHI y la Dirección Ejecutiva de Proyectos del Ministerio de Energía y Minas.

Sistema mixto eólico fotovoltaico en vivienda rural basada en el concepto de "Permacultura"

Esta tesis doctoral que lleva por nombre Sistema Mixto Eólico-Fotovoltaico SHEFV para una vivienda rural en la localidad de Piña de Esgueva (Valladolid) basada en el concepto de "PERMACULTURA"; tiene por finalidad ofrecer un método de aprovechamiento de los recursos que la naturaleza nos brinda sin por ello tener que causar daños irreversibles que pusieran en peligro la sostenibilidad del entorno, el proyecto tiene un claro carácter multidisciplinar, recabando los conocimientos necesarios en agricultura ecológica, arquitectura bioclimática, tratamiento de residuos y energías renovables.

OBJETIVOS DE TRABAJO

Objetivo General

Realizar una evaluación energética comparativa de un Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de baja potencia con sus subsistemas autónomos (sistema eólico y sistema fotovoltaico) para la electrificación de una vivienda rural para su reconversión energética.

Objetivos Específicos

1. Hacer uso de la energía eólica y solar para la utilización eficiente y sostenible de la energía eléctrica para el dimensionamiento de una instalación de un Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de baja potencia para una vivienda rural de la provincia de Tacna.
2. Realizar una evaluación de los recursos eólico y solar en un lugar referencial con fines de extrapolación a zonas con características similares en recursos eólico y solar.
3. Evaluar la calidad final del Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de baja potencia a través de la eficiencia energética, correcto dimensionamiento, servicio de energía eléctrica e instalación.

FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

Hipótesis General

La evaluación energética comparativa de un Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de baja potencia con sus subsistemas autónomos (sistema eólico y sistema fotovoltaico) para la electrificación de una vivienda rural, es factible desde el punto de vista económico.

Hipótesis Específicas

1. Es posible, hacer uso de la energía eólica y solar para la utilización eficiente y sostenible de la energía para el dimensionamiento de una instalación de un Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de baja potencia para una vivienda rural de la provincia de Tacna para su reconversión energética.
2. La evaluación y el análisis de las condiciones meteorológicas y climatológicas del lugar referencial son importantes para determinar la eficiencia del Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de baja potencia.
3. Es posible, realizar la evaluación de la calidad final del Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico de baja potencia indicando el suministro de electricidad y significando que se evitará la emisión a la atmósfera de dióxido de carbono (CO₂) y dióxido de azufre (SO₂).

CONTRIBUCIONES DEL AUTOR

1. Mostrar los detalles de la tecnología del sistema híbrido eólico-fotovoltaico para una vivienda.
2. Desarrollar un software para el estudio detallado de los recursos solar y eólico, los sistemas energéticos y los datos meteorológicos.
3. Realizó estudios sistemáticos de confiabilidad en tecnología y aplicación, la electrificación híbrida eólica-fotovoltaica. Mediante el concepto de Probabilidad de Pérdida de Carga, generalmente denominada LLP (Loss of Load Probability), tratando de forma conjunta la fiabilidad asociada al dimensionado de las instalaciones.

EXPERIMENTAL

MATERIAL Y MÉTODOS

Unidades de Análisis: En el estudio se utilizaron: 1 aerogenerador Rutland 910, 1 panel fotovoltaico Siemens, 1 divisor de voltaje, 1 circuito fotoeléctrico, 1 datalogger; y programas como: (Beta) Shefv Studio para el estudio de los recursos eólico y solar para los datos recopilados del periodo Febrero-Marzo 2010, WrPlot View versión 5.9, Weatherlink 5.5, Statgraphics Centurion XVI y SPSS versión 18.

Metodología:

Para la fase experimental se trabajó con los dos sistemas con conexión en paralelo, conectados al datalogger (previamente ambos sistemas estaban conectados a un divisor de voltaje), para realizar la evaluación se midió el voltaje de los sistemas en

paralelo y los datos meteorológicos (eólico y solar) las 24 horas del día de lunes a domingo. Para la obtención de los datos del squirrel se usó el programa de Análisis de Squirrel y de la estación meteorológica Vantage Pro2 el programa Weatherlink 5.5.1.

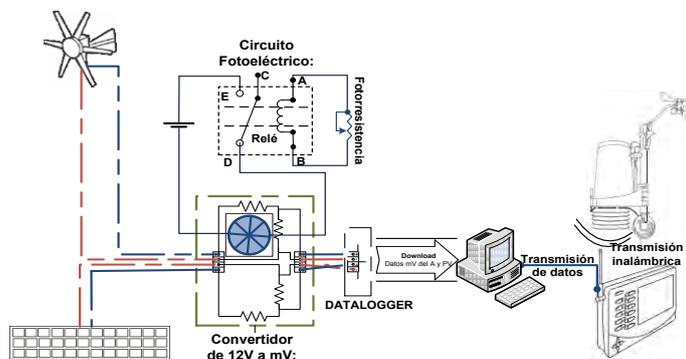


Gráfico 1. Esquema de instalación de los diversos equipos

Se procesaron los datos haciendo uso de los programas como Statgraphics Centurión, SPSS, WrPlot View, Shefv Studio (Beta) entre otros, obteniendo las curvas respectivas las cuales fueron utilizadas para la evaluación energética comparativa y dimensionamiento del sistema híbrido eólico fotovoltaico para una vivienda rural. Se calculó la eficiencia del sistema para conocer su rentabilidad en una vivienda rural.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla Nº01. Datos eólicos diarios del distrito de Tacna para el periodo febrero-marzo 2010
Estación: Centro de Energías Renovables de Tacna-CERT

Día Ordinal [-]	Velocidad [m/s]	Dirección [-]	P _{eólica} [W]	Día Ordinal [-]	Velocidad [m/s]	Dirección [-]	P _{eólica} [W]
32	2.06	NW	3.35	62	1.94	N/NE	2.82
33	1.94	NNW	2.83	63	2.21	NE	4.18
34	1.78	NNW	2.19	64	2.11	NE	3.64
35	2.05	NE	3.31	65	2.19	NE	4.07
36	2.27	NE	4.50	66	2.26	NE	4.43
37	1.77	NNE	2.12	67	2.13	NE	3.71
38	2.14	NE	3.77	68	2.06	NE	3.39
39	1.87	NE	2.53	69	2.36	N	5.08
40	2.03	NNW	3.23	70	2.18	NE	4.02
41	1.73	NNW	1.99	71	2.45	N	5.71
42	2.35	NE	5.02	72	2.42	NNE	5.46
43	2.27	NE	4.50	73	2.29	N	4.65
44	2.24	NE	4.33	74	2.24	NE	4.34
45	2.14	NE	3.77	75	2.46	NE	5.71
46	2.32	NNE	4.79	76	2.23	NNE	4.27
47	2.15	NNE	3.81	77	2.44	NE	5.63
48	2.53	NE	6.25	78	2.59	N	6.73
49	2.39	NNE	5.25	79	2.39	NNE	5.28
50	2.60	NE	6.80	80	2.39	NE	5.27
51	2.04	NNE	3.30	81	1.72	NE	1.97
52	2.39	NE	5.29	82	2.07	N	3.43
53	2.75	NE	8.01	83	2.51	NE	6.10
54	2.12	NE	3.70	84	2.25	NE	4.37
55	2.45	NE	5.67	85	2.20	NE	4.13
56	2.27	NE	4.50	86	2.03	NE	3.22
57	2.30	NE	4.71	87	1.86	NE	2.48
58	2.56	NNE	6.46	88	2.13	NE	3.72
59	2.36	NE	5.07	89	2.24	NE	4.36
60	2.47	N	5.81	90	2.19	NE	4.03
61	2.88	NNE	9.22				

Estación Meteorológica: Centro de Energías Renovables de Tacna-CERT.

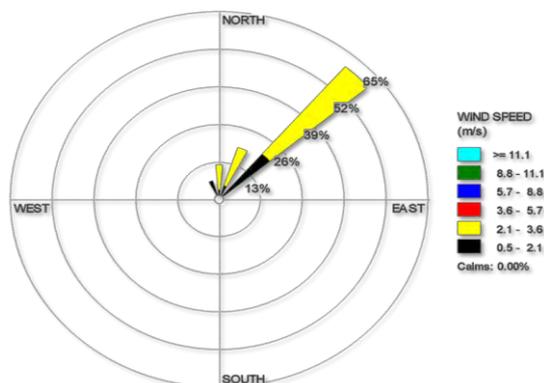


Gráfico Nº02. Rosa de los vientos para el periodo febrero-marzo 2010

Análisis del comportamiento

Nº de días del mes >=2 m/s:	51	días
Nº Horas del mes >=2m/s:	344.47	horas
Prom. de Velocidad del periodo:	2.23	m/s
Vel. mínima del periodo:	1.72	m/s
Vel. máxima del periodo:	2.88	m/s
Direc. predominante del periodo:	NE	
% de calma del viento:	0.00	%

Fuente: Tabla Nº01

Cuadro Nº01. Comparación del número de horas de velocidad de viento de los meses de febrero y marzo y horas totales para el periodo febrero-marzo 2010
Estación Meteorológica: Centro de Energías Renovables de Tacna-CERT

Viento	FEBRERO		MARZO		Periodo Febrero-Marzo	
	Total(h)	Promedio(h)	Total (h)	Promedio(h)	Velocidad (m/s)	Horas (h)
>=3 m/s:	101.45	3.62	117.62	3.79	2	127.63
>9 m/s:	0.00	---	0.00	---	3	120.87
0 m/s:	440.83	15.74	490.60	30.66	4	84.32
1 m/s:	66.72	2.38	70.80	4.43	5	11.78
2 m/s:	62.93	2.25	64.90	4.06	6	1.90
3 m/s:	55.08	1.97	65.78	4.11	7	0.18
4 m/s:	38.90	1.39	45.42	2.84	8	0.02
5 m/s:	6.00	0.22	5.78	0.36	Total(>2m/s): 344.47	
6 m/s:	1.28	0.07	0.62	0.06	Total(>4m/s): 98.20	
7 m/s:	0.17	0.02	0.02	0.02		
8 m/s:	0.02	0.02	0.00	---		
9 m/s:	0.00	---	0.00	---		
Totales (>2m/s):	164.38	5.87	Totales (>2m/s):	182.52	5.89	
Totales (>4m/s):	46.37	1.66	Totales (>4m/s):	51.83	1.67	

Tabla Nº02. Datos energéticos diarios del SME para el periodo febrero-marzo 2010
Estación: Centro de Energías Renovables de Tacna- CERT

Día Ordinal	I Aero [A]	V Aero [V]	P _p Aero [W]	P Aero [kW]	Día Ordinal	I Aero [A]	V Aero [V]	P _p Aero [W]	P Aero [kW]
32	0.37	1.97	1.62	0.38	62	0.25	1.33	0.99	0.26
33	0.39	2.02	1.65	0.41	63	0.32	1.70	1.31	0.44
34	0.30	1.59	1.24	0.23	64	0.31	1.61	1.13	0.35
35	0.27	1.42	0.93	0.26	65	0.29	1.51	1.12	0.38
36	0.33	1.75	1.36	0.53	66	0.32	1.66	1.28	0.41
37	0.50	2.60	2.05	0.41	67	0.32	1.68	1.34	0.39
38	0.30	1.60	1.17	0.42	68	0.27	1.43	1.06	0.29
39	0.26	1.35	0.96	0.30	69	0.25	1.32	0.97	0.33
40	0.27	1.41	0.99	0.36	70	0.28	1.48	1.12	0.35
41	0.18	0.95	0.56	0.14	71	0.27	1.42	1.00	0.36
42	0.22	1.17	0.72	0.30	72	0.31	1.61	1.22	0.38
43	0.33	1.75	1.36	0.53	73	0.31	1.60	1.20	0.36
44	0.30	1.59	1.18	0.45	74	0.28	1.48	1.06	0.33
45	0.30	1.60	1.17	0.42	75	0.29	1.50	1.12	0.41
46	0.33	1.71	1.24	0.50	76	0.30	1.57	1.10	0.28
47	0.34	1.78	1.31	0.39	77	0.30	1.56	1.12	0.38
48	0.37	1.94	1.48	0.62	78	0.33	1.74	1.30	0.43
49	0.40	2.11	1.63	0.66	79	0.30	1.59	1.17	0.40
50	0.35	1.85	1.39	0.68	80	0.31	1.60	1.19	0.37
51	0.35	1.83	1.40	0.45	81	0.32	1.71	1.17	0.11
52	0.43	2.27	1.66	0.53	82	0.33	1.73	1.30	0.40
53	0.41	2.15	1.90	0.72	83	0.28	1.47	1.00	0.42
54	0.36	1.91	1.59	0.50	84	0.26	1.39	0.99	0.49
55	0.33	1.75	1.39	0.60	85	0.28	1.44	1.01	0.50
56	0.31	1.65	1.30	0.49	86	0.27	1.40	0.98	0.47
57	0.32	1.70	1.40	0.58	87	0.24	1.27	0.83	0.35
58	0.31	1.63	1.27	0.62	88	0.24	1.28	0.83	0.38
59	0.28	1.49	1.08	0.44	89	0.25	1.31	0.87	0.36
60	0.35	1.84	1.50	0.59	90	0.25	1.29	0.87	0.28
61	0.34	1.77	1.40	0.70					

Comentario

La tabla Nº03 muestra los valores de velocidad, potencia eléctrica de salida (proporcionada por el Dr. Daniel Ferreira de la Universidade Federal de Pernambuco), potencia normalizada y horas del SME obtenidas para el periodo de Febrero-Marzo del 2010. Los valores de la tabla Nº03 están bien representados por la curva esquematizada en el gráfico Nº16 para el aerogenerador Rutland WG-910 de la marca Marlec; el valor de la velocidad máxima es 20m/s, su potencia eléctrica es 159W y la velocidad mínima es 2m/s, su potencia eléctrica es 0W.

El gráfico Nº03 presenta la Curva de potencia característica del Aerogenerador Rutland WG-910 de la marca Marlec (indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador para diferentes velocidades de viento). La curva de potencia es válida para las siguientes condiciones estándar del aire: densidad de aire de 1.225kg/m³, palas de rotor limpias y flujo de aire horizontal no perturbado. En esta gráfica se puede observar del comportamiento de la curva representativa, que la producción de potencia eléctrica disponible es directamente proporcional a la velocidad del viento (P~v). El gráfico Nº03, muestra la línea de tendencia (o regresión) de la potencia eléctrica disponible y la velocidad del viento, representada en la ecuación $Y = -0.034x^3 + 1.191x^2 - 2.148x + 5.350$, la cual nos ayuda a obtener los valores de potencia eléctrica disponible teniendo como referencia los valores de la velocidad de viento. Esta ecuación es válida para una serie de aerogeneradores de la misma familia Rutland WG-910 de la marca Marlec. El valor $r = 1$, nos indica correlación perfecta es decir tendencia a incrementarse la producción de potencia eléctrica disponible con el aumento de la velocidad del viento; y el elevado valor indica "correlación alta positiva", es decir demuestra que la influencia de la velocidad del viento en la producción de potencia eléctrica disponible es importante. Se puede afirmar que el 99.6%(R²) de los datos caen sobre la línea de regresión, puede predecirse perfectamente los valores promedios de potencia eléctrica disponible a partir de los valores de la velocidad del viento.

Tabla Nº03. Datos de potencia eléctrica de salida del aerogenerador Rutland wg-910 y número de horas para el periodo febrero-marzo 2010
Estación Meteorológica: Centro de Energías Renovables de Tacna-CERT

ESTIMACIÓN DE ENERGÍA DEL AEROGENERADOR: Rutland WG-910				
76 W				
Velocidad (m/s)	Potencia (W)	Potencia _{norm} (-)	Horas (h)	Producción (kWh)
2	0	0.00	127.83	0.00
3	6	0.08	120.87	0.73
4	10	0.13	84.32	0.84
5	14	0.18	11.78	0.16
6	25	0.33	1.90	0.05
7	31	0.41	0.18	0.01
8	39	0.51	0.02	0.00
9	47	0.62	0.00	0.00
9.6	56	0.74	0.0	0.00
10	65	0.86	0.0	0.00
11	76	1.00	0.0	0.00
12	87	1.14	0.0	0.00
13	99	1.30	0.0	0.00
13.5	112	1.47	0.0	0.00
14	125	1.64	0.0	0.00
15	140	1.84	0.0	0.00
16	146	1.92	0.0	0.00
17	158	2.08	0.0	0.00
18	158	2.08	0.0	0.00
19	159	2.09	0.0	0.00
20	162	2.13	0.0	0.00
TOTAL:			346.9	1.8

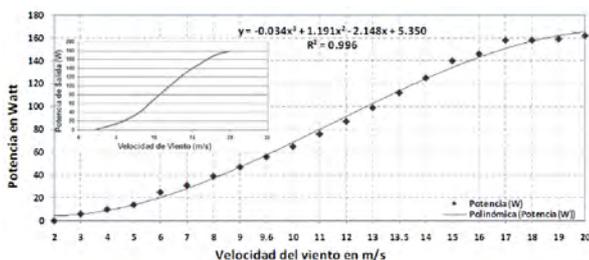


Gráfico Nº03. Curva de potencia del aerogenerador rutland wg-910

Estación Meteorológica: Centro de Energías Renovables de Tacna-CERT



Gráfico N°04. Curva de la potencia normalizada del aerogenerador Rutland wg-910 para el periodo febrero-marzo 2010

Comentario

El gráfico N°04 presenta la Curva de la potencia normalizada para el Aerogenerador Rutland WG-910 de la marca Marlec (indica cuál será la potencia normalizada disponible en el aerogenerador para diferentes velocidades de viento) para el periodo Febrero-Marzo. La curva de potencia normalizada representativa se encuentra en el intervalo: [1.7m/s-3.2m/s]. El gráfico N°04, muestra la ecuación de la curva de potencia normalizada planteada, representada por la ecuación $Y = (0.163x^3 - 0.494x^2 + 1.831)/76$, la cual nos ayuda a obtener los valores de potencia normalizada teniendo como referencia los valores de la velocidad de viento. Esta ecuación es válida para una serie de aerogeneradores de la misma familia Rutland WG-910 de la marca Marlec.

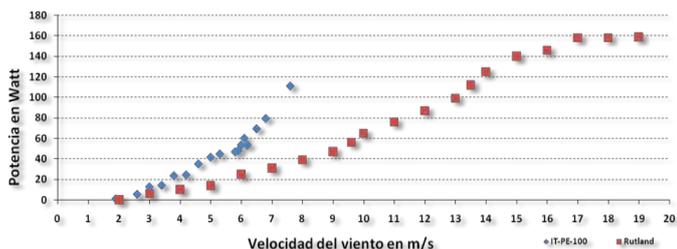


Gráfico N°05. Comparación de curvas de potencia de los aerogeneradores it-pe-100 y Rutland wg-910.

Comentario

IT-PE-100 versus Rutland WG-910 (Gráfico N°05)
 Los aerogeneradores comparados de aproximación polinómica de orden cuatro de la relación experimental entre potencia y velocidad del viento válida en el intervalo $v \in [0, \dots 19]$.

$$\sum_{i=0}^4 a_i x_i$$

De la representación de las funciones P(v)IT-PE-100 y P(v)WG-910 en un gráfico conjunto se obtienen las siguientes conclusiones: El aerogenerador IT-PE-100

trabaja con velocidades del viento bajas, en el intervalo $v \in [1.9, \dots 7.6]$. Y el aerogenerador Rutland WG-910 trabaja con velocidades del viento altas, en el intervalo $v \in [2, \dots 20]$. Por lo tanto el aerogenerador IT-PE-100 trabaja en un rango de velocidades menor que el aerogenerador Rutland WG-910. El aerogenerador IT-PE-100 tiene una potencia de salida mayor que el Rutland WG-910. Para el margen de velocidades comprendido entre 3 y 9 m/s.

Tabla N°04. Datos diarios de radiación solar global horizontal diaria para el distrito de Tacna periodo febrero-marzo 2010 Estación: Centro de Energías Renovables de Tacna-CERT

Día Ordinal	Irradiancia [kWh/m²-d]	Irradiación [kWh/m²]	Rad_solar [W/m²]	Rad_solar [W/m²]	Día Ordinal	Irradiancia [kWh/m²-d]	Irradiación [kWh/m²]	Rad_solar [W/m²]	Rad_solar [W/m²]
32	6.19	1.20	0.97	573	62	6.34	1.23	917	585
33	6.78	1.31	0.97	655	63	6.53	1.26	903	621
34	5.38	1.04	1.09	573	64	6.14	1.19	917	588
35	4.95	0.96	1.31	471	65	6.18	1.20	899	619
36	5.75	1.11	1.12	590	66	6.31	1.22	889	641
37	7.11	1.38	1.17	682	67	6.41	1.24	894	596
38	6.66	1.29	0.96	668	68	6.35	1.23	882	610
39	6.17	1.20	1.11	558	69	6.29	1.22	882	600
40	5.75	1.11	0.98	586	70	6.23	1.21	874	597
41	2.58	0.50	0.49	271	71	6.21	1.20	876	595
42	6.74	1.31	0.95	625	72	6.26	1.21	876	602
43	6.82	1.32	0.93	648	73	6.18	1.20	876	599
44	6.33	1.23	0.93	649	74	6.26	1.21	878	592
45	5.35	1.04	0.93	569	75	6.21	1.20	880	605
46	5.98	1.16	0.95	629	76	3.39	0.66	1154	338
47	5.12	0.99	1.04	515	77	5.95	1.15	853	575
48	6.89	1.34	1.09	629	78	5.75	1.12	860	581
49	6.25	1.21	1.14	608	79	5.92	1.15	855	584
50	6.10	1.18	0.92	602	80	5.19	1.01	880	541
51	5.99	1.16	0.94	586	81	2.41	0.47	662	273
52	4.42	0.86	1.11	475	82	6.01	1.16	883	595
53	5.68	1.10	0.92	534	83	6.08	1.18	882	621
54	5.77	1.12	0.91	566	84	5.65	1.10	869	618
55	6.10	1.18	0.98	601	85	5.66	1.10	866	602
56	5.49	1.06	1.03	590	86	5.64	1.09	857	632
57	6.66	1.29	0.91	651	87	5.09	0.99	989	559
58	6.62	1.28	0.91	639	88	5.10	0.99	1010	547
59	6.16	1.19	0.97	588	89	5.90	1.14	869	589
60	6.58	1.28	0.98	607	90	5.86	1.13	869	579
61	6.45	1.25	0.98	638					

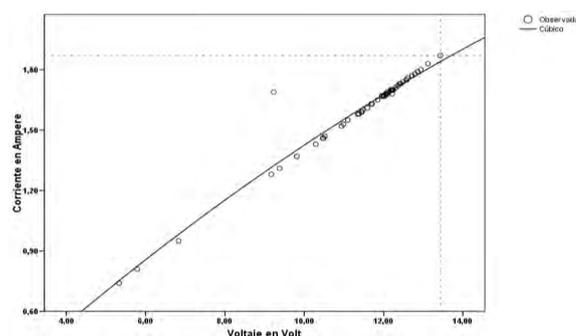


Gráfico N°06. Curva de corriente y voltaje influenciada por la radiación promedio del SMFV para el periodo febrero-marzo 2010

Comentario

El gráfico N°60, muestra la línea de tendencia (o regresión) de la corriente y el voltaje para el periodo Febrero-Marzo 2010, representada en la ecuación $Y = -0.003x^2 + 0.188x - 0.170$, la cual nos ayuda a obtener los valores de corriente teniendo como referencia los valores del voltaje. Esta ecuación es válida para una serie de paneles fotovoltaicos de la misma familia SM-50 de la marca Siemens. El valor $r = 0.98$, nos indica correlación directa es decir tendencia a incrementarse la producción de corriente con el aumento; y el elevado valor indica "correlación alta positiva", es decir demuestra que la influencia del voltaje en la producción diaria de corriente para el periodo Febrero-Marzo 2010 es importante.

Tabla Nº05. Datos energéticos diarios del SMEFV para el periodo febrero-marzo 2010.
Estación Meteorológica: Centro de Energías Renovables de Tacna-CERT

Día Ordinal [d]	I Shefv [A]	V Shefv [V]	P _s Shefv [W]	P Shefv [kW]	Día Ordinal [d]	I Shefv [A]	V Shefv [V]	P _s Shefv [W]	P Shefv [kW]
32	1.80	11.27	23.93	15.39	62	1.78	11.58	24.56	15.87
33	1.85	11.68	26.18	16.42	63	1.96	12.32	27.96	17.84
34	1.58	10.02	20.38	11.70	64	1.84	11.85	25.12	15.78
35	1.37	8.55	15.95	10.75	65	1.80	11.57	25.70	16.16
36	1.58	9.75	20.90	14.04	66	1.90	12.11	26.85	16.72
37	1.94	12.35	27.78	17.81	67	1.85	11.91	25.86	16.73
38	1.72	10.94	23.73	16.11	68	1.86	12.04	26.09	16.49
39	1.64	10.53	20.96	14.23	69	1.80	11.52	24.88	16.37
40	1.56	9.92	20.41	13.75	70	1.83	11.79	25.44	16.31
41	0.88	5.52	5.76	3.31	71	1.77	11.45	24.49	16.31
42	1.44	9.09	17.15	11.09	72	1.80	11.60	25.09	16.28
43	1.70	10.82	23.38	17.09	73	1.89	12.19	26.49	16.42
44	1.97	12.54	28.86	17.72	74	1.81	11.67	25.06	16.44
45	1.57	9.81	19.70	12.65	75	1.79	11.54	24.87	16.64
46	1.64	10.16	22.09	13.96	76	1.13	6.92	11.33	6.61
47	1.64	10.08	20.58	12.25	77	1.76	11.38	24.08	15.82
48	1.84	11.52	25.24	17.44	78	1.87	12.01	25.82	15.88
49	1.88	11.55	25.80	16.46	79	1.75	11.39	23.63	15.36
50	1.74	10.68	23.89	16.10	80	1.59	10.20	20.70	12.13
51	1.80	11.42	25.00	16.03	81	0.84	5.34	5.00	2.45
52	1.50	8.87	17.43	10.20	82	1.86	11.90	25.43	15.36
53	1.73	10.66	22.40	14.51	83	1.67	10.72	22.48	14.63
54	1.79	11.18	24.82	16.21	84	1.48	9.43	20.00	14.08
55	1.77	11.12	24.18	16.49	85	1.48	9.27	19.57	13.77
56	1.80	11.35	24.33	14.16	86	1.53	9.75	20.52	13.81
57	1.90	12.00	27.52	18.22	87	1.31	8.33	16.85	11.43
58	1.82	11.41	27.52	17.79	88	1.26	8.04	15.47	10.58
59	1.80	11.48	27.52	16.70	89	1.63	10.55	21.70	14.43
60	1.87	11.69	27.52	17.84	90	1.69	11.05	22.66	14.28
61	1.89	11.77	26.54	17.70					

Estación Meteorológica: Centro de Energías Renovables de Tacna-CERT

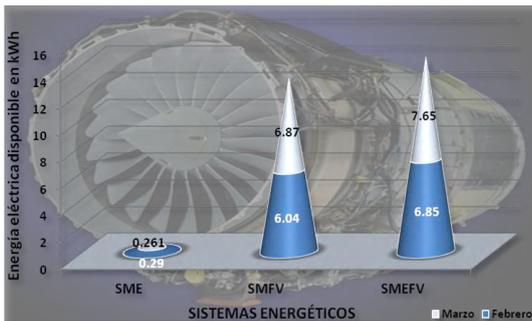


Gráfico Nº07. Comparación de producción de energía eléctrica obtenida de los SME, SMFV y SMEFV para el periodo febrero-marzo 2010

Comentario

El gráfico Nº07 muestra la comparación de los tres sistemas con sus respectivas producciones mensuales de energía eléctrica obtenidas durante el periodo Febrero-Marzo 2010, destacando el Shefv seguido del sistema fotovoltaico y con una baja producción el sistema eólico; siendo sus valores: 14.5, 12.91 y 0.55 kWh respectivamente. El gráfico Nº09 muestra el porcentaje de aporte de energía eléctrica al Shefv de los sistemas solar y eólico, se puede observar que para el periodo Febrero-Marzo 2010 el porcentaje de aportación promedio del sistema eólico es 4% y del sistema fotovoltaico aportó 96%. Es bastante la diferencia esto se debe al aerogenerador, es un aerogenerador que no trabaja a velocidades de vientos bajos.

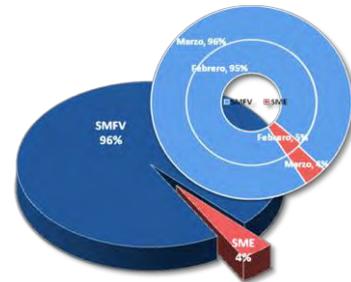


Gráfico Nº08. Porcentaje de aporte de energía eléctrica al SHEFV obtenida de los sistemas eólico y fotovoltaico para el periodo febrero-marzo 2010

Cuadro Nº02. Resumen del método de Langer-Beyer (método del peor mes) para el sistema híbrido eólico fotovoltaico para el periodo febrero-marzo 2010.

RESUMEN DEL METODO LANGER-BEYER PARA SHEFV

Descripción: Parámetros necesarios para el método de LLP para SHEFV (Método del peor mes)

Parámetros relacionados con el mes de peores condiciones de viento	
Velocidad media mensual [V _{med}]:	2.21 (m/s)
Meses:	Febrero
Factor de potencia eólico [FPE]:	0.71 [-]
Valor medio de irradiación solar de los meses con menor velocidad de viento [G _s]:	5.9 (kWh/m ²)

Parámetros relacionados con el mes de peores condiciones de radiación	
Valor medio mínimo de la irradiación sobre el plano el array [G _{dim}]:	5.8 (kWh/m ²)
Meses:	Marzo
Índice de claridad [K _f]:	0.64 [-]
Velocidad media mensual [V _{prom}]:	2.26 m/s
Factor de potencia eólico [FPE]:	0.82 [-]

Comentario

El cuadro Nº02 muestra el resumen del método de LANGER-BEYER para SHEFV, éste método es parecido al “método del peor mes” del SMFV, se realiza un balance de energía seleccionando un periodo de tiempo, normalmente un mes, el cual tiene las condiciones más desfavorables de los sistemas eólico y solar (peores condiciones de viento y peores condiciones de radiación), si el sistema funciona en este mes, funcionará también para los demás meses del año. Los resultados que muestra el método de LANGER-BEYER para SHEFV son:

1. El mes con peores condiciones de viento es: Febrero, con una velocidad media mensual: 2.21m/s, con factor de potencia eólico: 0.71 e irradiación media mensual: 5.9kWh/m².
2. El mes con peores condiciones de radiación es: Marzo, con una irradiación media mensual: 5.89kWh/m², con índice de claridad: 0.64, con velocidad media mensual: 2.26m/s y con factor de potencia eólico: 0.82.

No se puede determinar cuál de los dos meses tiene las peores condiciones, el método es para un año, por ello muestra dos resultados diferentes, dos meses diferentes.

Evaluación del consumo mensual de C.A.					
Consumo	Descripción de equipos	# de Equipos (n)	(P _{nom}) [W]	Horas (H) [h]	P _{nom} ·H·N [kWh]
Iluminación	Habitaciones	3	32	4	640
	Baños	4	23	0.5	46
	Cocina/sala	2	32	1	64
TOTAL		11	87	5.5	750
Electrodomésticos	Televisor	4	100	5	2000
	Radio	1	50	2	100
	DVD	1	10	1	10
	Computadora	1	940	5	4700
TOTAL		7	1100	13	6810
Comunicación	Celular	3	20	0.5	30
	TOTAL				0
TOTAL		3	20	0.5	30
TOTALES		21	1207	19	7590

Margen de captación de seguridad (Eb):	1.5 %
Eficiencia el Inversor (EI):	85 %
Potencia nominal del Inversor (P _{inver}):	1500 W
Potencia de salida c.a. (P _{salida}):	1207 W
Consumos de corriente continua (G ₁):	0.6 kWh
Consumos de corriente alterna (G ₂):	10268.8 kWh
Consumos totales (G ₁ +G ₂):	10269.4 kWh
Consumos totales (G ₂):	10.27 kWh
Corriente del Inversor c.c.:	118.3 A

Figura Nº01. Cálculo de demanda energética para una vivienda.

Cuadro Nº03. Determinación del costo del \$./kwh del SHEFV para el periodo febrero-marzo 2010

Ingreso de Datos:	
Consumo de Energía Eléctrica :	7.16 kWh
Producción del Shefv :	7.25 kWh
Potencia del sistema :	126 W
Costo del sistema instalado :	1190 \$
Costo del capital del equipo instalado (p) :	9444 \$/kW
Tipo de Cambio (\$):	2.9 \$/.
Costo del sistema (Cs) :	3451 \$/.
Tasa de interes anual para la inversión (r) :	0.06 - (por ejem. 6%)
Número de años de amortizar la inversión, vida útil (n) :	20 años
Fracción de los costos de capital-mantenimiento Anual (m) :	0.01 - (por ejem. 2% del costo del kW)
Potencia media generada dividida por la pot. inst. (f) :	0.1 -
Electrosur-Precio unitario \$/./kWh + cargos + I.G.V. 19% :	0.52 \$/.

Salida de Datos:	
Costo 1kWh generado por el sistema (c) :	0.79 \$/kWh
Costo 1kWh generado por el sistema del capital :	2.28 \$/kWh
	0.74 \$/kWh
Diferencia entre Producción y Consumo de EE :	2.16 \$/kWh
	0.09 kWh

Cuadro Nº04. Software-plantilla SHEFV studio (beta)

MENÚ DEL SHEFV					
Meses	Semanas				
Enero	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Febrero	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Marzo	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Abril	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Mayo	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Junio	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Julio	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Agosto	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Septiembre	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Octubre	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Noviembre	1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Diciembre	1ra	2da	3ra	4ta	5ta

Método del SHEFV Ir a Soleamiento e Irradiación/Cuantificación Eólica

Comentario

El Software-plantilla Shefv Studio (Beta) es un software que forma parte de la tesis: "Evaluación energética comparativa de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de baja potencia para la electrificación de una vivienda rural", fue desarrollado con la finalidad de permitir el mayor control (acceder, analizar, crear y navegar) sobre 12 variables (17280 datos) con intervalos de tiempo de 1 minuto, comprendidas entre datos meteorológicos y energéticos del sistema híbrido eólico fotovoltaico que se ingresan diariamente; así también muestra los resultados obtenidos para 1 día(s), semana(s), mes(es) y/o año. El fácil diseño del software-plantilla permite construirlo en un tiempo corto y aprovechar los comandos y funciones disponibles del excel, sin perder la buena presentación de datos.

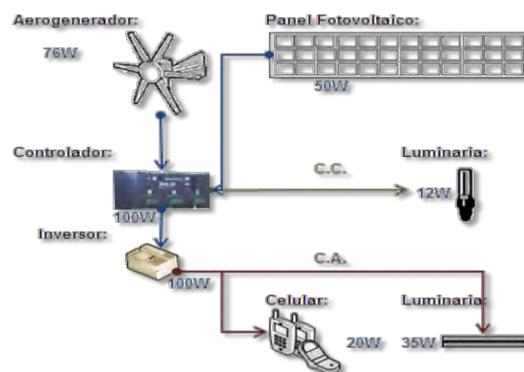


Figura Nº02. Esquema de la instalación del SHEFV

A. Vivienda Rural con consumos energéticos tradicionales



B. Vivienda Rural con Shefv

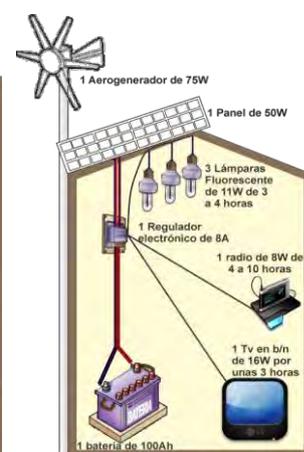


FIGURA Nº03. RECONVERSIÓN ENERGÉTICA DE UNA VIVIENDA RURAL

La Figura 03.A muestra una vivienda rural con consumos energéticos tradicionales mensuales, con una emisión al aire de 4.84Kg de Dióxido de Carbono(CO2) y con 568g de elementos químicos altamente contaminantes conformados por Cinc metálico(Zn), Carbono(C), Dióxido de Manganeso(MnO2), Cloruro de Amonio(HN3Cl), Hidróxido de Potasio(K(OH)2) y Mercurio(Hg); los cuales contaminarían 1'590,000 litros de agua. La Figura 03.B muestra una vivienda rural con Shefv, el cual suministra energía eléctrica para 3 lámparas fluorescentes de 11W, 1 radio de 8W y 1 Tv b/n de 16W.

REFERENCIAS

- [1] DEVORE J., Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, 6^a Ed., International Thomson Editores S.A. de C.V., México, 2005.
- [2] PACCO K., Informe de prácticas pre-profesionales; Vientos de Tacna (2005).
- [3] TORRES H., Evaluación Energética del Potencial Energético Solar, (1997) 50.
- [4] ZORA F., TACNA HISTORIA Y FOLKLORE, Editorial y librería "SANTA MARÍA", 1969.
- [5] Microsoft Corporation, Microsoft® Encarta® 2009 [DVD], (2008).
- [6] Escudero P., Sistema mixto eólico fotovoltaico en una vivienda rural basada en el concepto de Permacultura, (Mayo 1998),(Paper), en: www.it46.se/entry/61
- [7] Davis Instruments, Vantage Pro2, (Manual), en: http://www.weathershop.com/davis_vantage_pro2.htm
- [8] Fresenius W. y otros, Squirrel 1200 Data Logger Squirrel Analysis Program, (Manual de instrucción), en: legacy.library.ucsf.edu/tid/mcm56e00
- [9] Chiroque J., Microaerogeneradores de 100W para uso rural, (Paper), en: <http://www.itdg.org.pe/publicaciones/pdf/Microaerogenerador%20IT%20PE%20100%20para%20electrificacion%20rural.pdf>
- [10] Microsiervos.com, ¿Qué es la emisión de CO2 por kilómetro recorrido? (gCO2/km), en: <http://eco.microsiervos.com/practico/que-es-emision-co2-kilometro-recorrido.html>
- [11] Pilasmasbaratas.com, Pila cilíndrica salina LR20 / D - 1,5V – Player, en: <http://www.pilasmasbaratas.com/pilas-salinas-lr3-lr6-lr20-lr14/pila-salina-lr20-d-1-5v-player-182.html>
- [12] UPME, ANTEPROYECTO DE NORMA AEROGENERADORES REQUISITOS DE SEGURIDAD, (Paper), en: http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/normalizacion/ANTEPROYECTO_DE_NORMA_AEROGENERADORES_REQUISITOS_DE_SEGURIDAD.pdf

E-mail: Cleopatra_Bvza@yahoo.es