

Caracterización de perfiles de generación de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos de pequeña escala

VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio*†, CONTRERAS-AGUILAR, Luis, CASTILLO-TOPETE, Víctor y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio

Universidad de Colima, campus Coquimatlán, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Km 9 carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México

Recibido 11 de Enero, 2017; Aceptado 16 de Marzo, 2017

Resumen

La incorporación de sistemas fotovoltaicos en los sistemas eléctricos se ha incrementado considerablemente en los últimos años. El impacto económico al reducir la dependencia de combustibles fósiles y lograr ahorros significativos por esta tecnología, se ha vuelto una realidad que sigue avanzando día con día. El comportamiento de tales sistemas, generalmente es monitoreado en tiempo real mediante el registro de la potencia activa de salida a lo largo del día. La variabilidad que presentan estos sistemas con respecto de un día a otro, principalmente se debe a factores como la radiación, nubosidad, temperatura, etc. En este artículo se presenta una metodología para la caracterización de perfiles de potencia activa en sistemas fotovoltaicos de pequeña escala con el fin de identificar la relación que tienen aspectos como la cantidad de nubes, duración de la nubosidad, época del año en la producción de energía eléctrica. Datos históricos de perfiles de generación de energía eléctrica con paso de muestreo cada cinco minutos, han sido tomados de dos sistemas fotovoltaicos de 1 y 2 kWp para realizar la caracterización de sus perfiles de potencia activa. El impacto de la nubosidad en estos sistemas es presentado mediante factores de nubosidad propuestos.

Perfiles de generación, sistemas fotovoltaicos, factores de nubosidad

Citación: VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, CONTRERAS-AGUILAR, Luis, CASTILLO-TOPETE, Víctor y CONCHA-SÁNCHEZ, Antonio. Caracterización de perfiles de generación de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos de pequeña escala. *Revista de Ingeniería Tecnológica* 2017. 1-1:48-56

Abstract

The incorporation of photovoltaic systems in electrical systems has increased considerably in recent years. The economic impact of reducing dependence on fossil fuels by achieving significant savings from this technology has become a reality that continues to advance day by day. The behavior of such systems is generally monitored in real time by recording the active output power throughout the day. The variability that these systems present with respect to one day to another mainly is due to factors like the radiation, cloudiness, temperature, etc. This article presents a methodology for the characterization of active power profiles in small scale photovoltaic systems in order to identify the relationship that has aspects such as the number of clouds, duration of cloudiness, time of year in the production of energy Electric. Historical data of photovoltaic generation profiles with sampling step of every five minutes have been taken from two photovoltaic systems of 1 and 2 kWp to perform the characterization of their active power profiles. The impact of cloud cover on these systems is presented by proposed cloudiness factors.

Output profiles, photovoltaic systems, cloudiness factors

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: tvenegas@uclm.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

El aprovechamiento de fuentes renovables para la producción de energía eléctrica ha incrementado la incorporación de sistemas fotovoltaicos interconectados a los sistemas eléctricos. En este tenor, México ha fijado metas a corto y mediano plazo para la generación de energía eléctrica a partir de fuente renovables. Se pretende la participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica del 25% para el año 2018, 30% para el año 2021 y 35% para el año 2024. Con las reformas implementadas en el sector energético se han comenzado a visualizar resultados en diversificación de fuentes de generación. En 2016, el 20.31% de la energía eléctrica fue generada con fuentes limpias. Las tecnologías que mostraron mayor crecimiento fueron la eólica, la fotovoltaica y cogeneración eficiente. Con respecto a la energía fotovoltaica, esta tuvo una evolución importante en capacidad instalada, al pasar de 170 MW en 2015 a 389 MW en 2016, lo que representa un adición de 128% a la capacidad existente. Mientras que el crecimiento en generación fotovoltaica paso de 190.26 GWh en 2015 a 214.79 Gwh, lo que representa un incremento de 12.89% (Reporte SENER 2016).

Además, la adición de capacidad fotovoltaica instalada ha sido en pequeña y mediana escala para usuarios residenciales y comerciales con servicios en media y baja tensión. No obstante, la generación fotovoltaica presenta importantes retos en sistemas de gran escala al ser interconectados a la red eléctrica, razón por la cual operan bajo esquemas aislados de la red eléctrica, ofreciendo energía en comunidades lejanas donde no se cuenta con el servicio de energía eléctrica.

La búsqueda de soluciones técnicas y operativas de los sistemas fotovoltaicos con la red eléctrica brinda la oportunidad de buscar soluciones que permitan su incorporación al despacho de energía del sistema eléctrico nacional. Por lo que impulsar estudios que caractericen el desempeño de los sistemas fotovoltaicos podría contribuir a una pronta incorporación que esta tecnología promete.

Diversos factores meteorológicos tales como nubosidad, hora del día, radiación solar, temperatura entre otros, provocan que la potencia generada por estos sistemas fluctúe a lo largo del tiempo efectivo de generación (shi, et al 2011, Chicco, et al 2014). Por ende

Con la incorporación de técnicas de monitoreo a través de esquemas de comunicación y almacenamiento vía internet, los registros del comportamiento respecto a la generación de energía eléctrica han dado lugar a una gran cantidad de datos históricos de sistemas fotovoltaicos. Estos datos generalmente representan mediciones secuenciales en el tiempo. Con el empleo de la minería de datos en series de tiempo, los registros de perfiles de generación fotovoltaica se convierten en una oportunidad para extraer la mayor cantidad de información significativa (Esling y Agon, 2012).

El manejo de la información registrada como perfiles de generación fotovoltaica requiere un análisis exhaustivo que permita extraer parámetros que representen el comportamiento de dichos sistemas. En este artículo se propone una metodología para identificar la cantidad de nubes, la energía producida, la potencia máxima alcanzada durante el tiempo de operación, así como la duración de las nubes presentes.

Mediante el desarrollo de un programa computacional en Matlab®, se han analizado perfiles de generación con intervalos de monitoreo de 5 minutos. El método de agrupamiento k-medias ha sido usado con el fin de administrar en grupos los perfiles de generación a partir de un criterio específico (Hartigan y Wong, 1979). También, cuatro tipos de día han sido propuestos para cuantificar el potencial de los sistemas fotovoltaicos.

Monitoreo de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos interconectados de pequeña escala han comenzado a tener una importante presencia en los sectores residenciales y comerciales. Con la aprobación de la Ley y Reglamento para el Aprovechamiento de Fuentes de Energía Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE (2012), LAERFTE (2012)), aunado al incremento en los costos de energía eléctrica, los usuarios han puesto la mirada en emplar la energía solar para producir energía eléctrica y reducir sus costos asociados al recurso energético. La principal ventaja que tienen estos sistemas es su poco mantenimiento y su expectativa de vida que oscila entre 25 y 30 años, resultando una opción atractiva y viable que permite que los costos nivelados de energía sean competitivos con los ofrecidos por la compañía suministradora (Aldo et al, 2014, Venegas et al, 2016).

Existen empresas dedicadas a la puesta en operación de sistemas fotovoltaicos de pequeña escala, las cuales ofrecen el monitoreo de diversos parámetros eléctricos en intervalos de tiempo que son visualizados mediante una plataforma computacional. El sistema empleado para el monitoreo de parámetros en este estudio es el programa Enlighten (Enphase 2017).

Estas bases de datos administradas por compañías suministradoras de sistemas fotovoltaicos, ofrecen registros que son almacenados y pueden descargarse, lo cual permiten contar con información de los perfiles de generación para una ubicación geográfica específica donde fue instalado el sistema fotovoltaico.

A partir de dos sistemas fotovoltaicos de 1 y 2 kWp puestos en operación en mayo y julio de 2014, la Universidad de Colima cuenta con información de producción de energía eléctrica y de perfiles de generación a lo largo del día en intervalos de 5 minutos por un período de tres años de operación. Las características de estos sistemas fotovoltaicos interconectados son mostradas en la Tabla I.

Componente	Capacidad del Sistema Fotovoltaico Interconectado	
	1 kWp	2 kWp
Microinversor Enphase M215, L1741/IEEE1547, FCC Part 15 Class B	4	8
Módulos fotovoltaicos Monocristalinos Solartec S60MC 250 W.	4	8
Equipo de monitoreo Envoy R-NA. No. Serie:	121343014526	121343014413
Latitud	19°15'6.56"N	19°16'36.11"N
Longitud	103°41'40.56"O	103°42'35.20"O

Tabla 1 Especificaciones de los sistemas fotovoltaicos

La tabla 2 muestra el esquema de generación de energía eléctrica del sistema fotovoltaico de 1 kWp para el año 2015.

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	4.30	1.74	5.11	5.20	4.97	4.65	4.80	4.92	3.97	3.36	5.10	3.57
2	3.93	2.10	5.00	5.17	4.64	4.30	4.30	3.64	4.36	5.00	3.76	3.48
3	3.26	3.35	5.10	3.62	4.61	4.02	3.94	4.54	3.10	3.84	4.18	3.65
4	2.01	4.94	4.40	4.85	4.94	3.84	3.48	3.93	2.59	1.68	4.70	3.98
5	2.07	3.22	4.28	4.82	4.87	2.58	4.93	4.01	4.52	4.89	4.58	4.16
6	4.25	4.35	4.79	5.01	4.47	4.67	3.29	3.71	3.41	4.05	3.62	3.94
7	4.26	4.60	4.47	4.66	4.63	4.79	2.32	3.65	3.59	3.96	3.95	3.37
8	3.22	4.79	4.48	4.62	4.15	4.55	3.12	3.49	4.05	4.29	4.09	2.58
9	3.88	4.77	3.48	5.07	4.44	3.50	4.08	4.77	4.43	4.47	4.49	1.89
10	4.07	4.21	2.65	4.65	4.67	3.90	4.68	4.09	4.38	3.56	4.26	3.16
11	4.58	4.26	3.00	4.37	4.69	3.27	2.68	4.42	4.85	4.88	4.31	2.39
12	4.31	4.43	5.64	4.47	4.48	3.15	3.21	4.23	5.15	4.43	3.77	1.80
13	2.57	1.64	4.97	4.45	4.32	3.73	2.28	3.06	4.91	4.24	3.51	3.05
14	3.52	1.69	1.45	5.06	4.03	3.59	3.16	4.04	4.62	3.78	4.40	4.71
15	4.45	1.54	1.39	4.65	3.71	2.39	3.10	4.82	3.56	4.21	4.52	4.22
16	4.38	2.48	0.62	4.69	4.78	3.19	4.79	3.40	3.61	4.01	3.60	4.54
17	4.13	4.27	2.62	4.43	4.29	2.84	4.44	2.85	4.60	4.61	2.91	4.49
18	3.92	5.20	4.68	4.82	4.08	4.27	4.71	4.33	4.18	4.60	4.01	3.79
19	3.88	5.07	5.48	4.97	4.38	2.97	2.37	4.68	3.60	4.05	3.26	3.87
20	3.72	4.77	3.90	5.11	4.47	2.38	4.06	4.54	4.57	4.69	3.46	3.53
21	4.01	5.05	5.00	4.98	4.46	4.94	4.44	4.63	4.31	3.91	3.45	3.37
22	3.81	4.56	5.35	4.84	3.74	4.37	3.87	2.86	4.81	2.03	3.26	3.19
23	4.42	4.73	5.07	4.66	4.36	3.75	4.53	4.08	4.41	0.25	4.12	3.71
24	3.46	4.85	5.29	4.24	4.62	4.15	4.41	4.91	4.68	3.17	3.83	4.26
25	1.73	5.13	4.64	4.76	4.64	3.27	4.63	4.96	2.78	4.56	2.51	3.99
26	2.58	5.27	5.45	4.54	4.80	4.22	3.89	3.85	3.79	3.21	1.15	4.26
27	4.10	5.31	4.72	4.17	4.16	3.73	4.80	3.96	4.19	3.78	1.67	3.67
28	4.07	5.33	5.02	4.03	3.66	2.87	3.73	4.50	4.16	3.52	4.40	3.93
29	3.95		5.38	2.75	2.68	4.19	4.88	4.19	4.29	2.88	4.01	2.75
30	2.73		4.90	4.53	2.69	4.36	2.71	3.82	4.16	1.05	3.46	3.79
31	3.16		4.90		3.26		4.06	3.85		2.79		3.20

Tabla 2 Mapa de generación diaria del sistema fotovoltaico de 1 kWp

Metodología propuesta

Con el fin de analizar los datos registrados del monitoreo de sistemas fotovoltaicos de pequeña escala en esta sección se propone identificar información relevante diaria que permita cuantificar los parámetros referentes a la cantidad de nubes, duración del paso de las nubes, potencia máxima generada, energía producida, tiempo de inicio y de término de generación, tiempo en que se presenta la potencia máxima.

La metodología propuesta se basa en la información registrada tanto para perfiles de generación en los que se cuenta con una gran cantidad de nubes y en los que es escasa, identificándose como días nublados y soleados, respectivamente.

Los gráficos 1 y 2 muestran los perfiles de generación para los días señalados anteriormente. En la figura 2 se puede observar que el cambio de pendiente en la curva de potencia se presenta después de alcanzar el valor máximo de generación, para después continuar su descenso hasta la ausencia de rayos de sol sobre el sistema. Este comportamiento puede considerarse a partir de un día soleado sin nubes presentes sobre el sistema fotovoltaico. Por otro lado, la figura 3 muestra un perfil de generación con depresiones o cambios de pendiente antes de alcanzar la generación máxima, y lo mismo ocurre durante el periodo de disminución en la producción de energía eléctrica. En este caso, el comportamiento registrado en el perfil de generación es considerado como día nublado. Notese que el paso de nubes provoca el cambio de pendiente en la curva de generación y donde m_i representa el cambio de pendiente en un tiempo t_i .

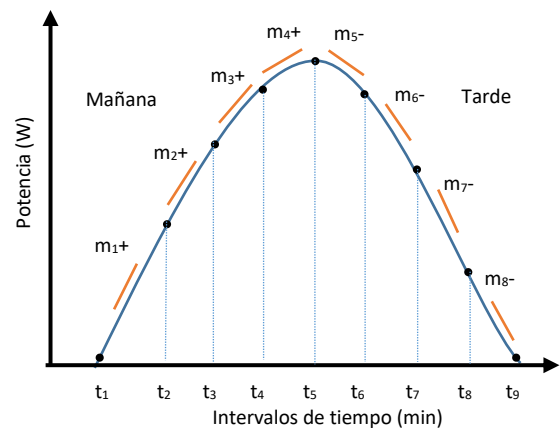


Gráfico 1 Perfil de generación de un día soleado

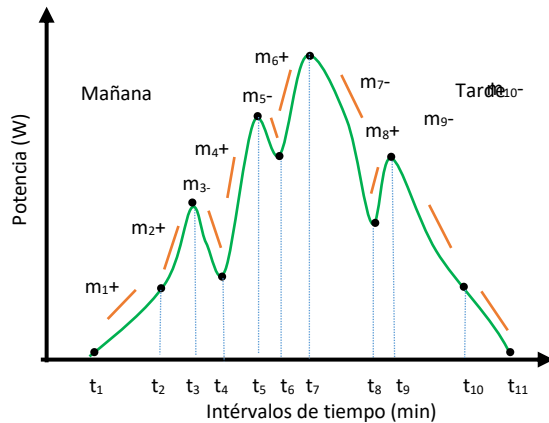


Gráfico 2 Perfil de generación de un día nublado

Parámetros relevantes

A partir del monitoreo de sistemas fotovoltaicos interconectados es posible identificar una serie de parámetros eléctricos que permiten agrupar los perfiles de generación a partir de criterios tales como cantidad de nubes, duración de nubes, energía producida, potencia máxima de generación, etc. Las ecuaciones (1) a (4) son de dominio público.

Cantidad de nubes

La identificación de cantidad de nubes presentes en un perfil cualquiera puede determinarse mediante la cuantificación de cambios de pendiente que se presentan a lo largo del día mediante la siguiente expresión:

$$m_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{t_{i+1} - t_i} \quad i=1, 2 \dots i_{max-1} \quad (1)$$

Donde P_i representa la potencia generada.

Energía generada

La energía generada puede determinarse mediante la integral definida de la curva del perfil de generación desde un tiempo de inicio hasta un tiempo de término.

$$E = \int_{t_{inicial}}^{t_{final}} P(t) dt \quad \text{en (kWh)} \quad (2)$$

Potencia máxima de generación

La potencia máxima de generación se determina mediante el valor máximo presentado del perfil de generación.

$$P_{max} = \max(P(t)) \quad \text{en (kW)} \quad (3)$$

Duración de la cantidad de nubes

En la determinación de la cantidad de nubes presentes, es posible también cuantificar su duración, esto puede llevarse a cabo con una variable adicional que permita registrar los intervalos de tiempo una vez presentado el cambio de pendiente.

$$t_d = \sum_{t_{inicial}}^{t_{final}} \Delta t_m \quad \text{para } (m_{t_{i+1}} = m_{t_i}) \quad (4)$$

Tiempo de inicio de generación

$T_{inicial}$ Este tiempo es determinado inmediatamente después de que el sistema comienza a registrar el primer valor de potencia diferente de cero cada día.

Tiempo de término de generación

T_{final} Este tiempo es determinado como el último valor registrado distinto de cero al término del día.

Tiempo en el que se presenta la potencia máxima

T_{max} es este se relaciona directamente cuando se presenta la potencia máxima P_{max} .

Con el objeto de aplicar la metodología a un conjunto de perfiles de generación registrados de los sistemas fotovoltaicos interconectados, han sido considerados los registros del año 2015 para el sistema de 1 kWp. La figura 1 muestra los perfiles de generación agrupados mensualmente.

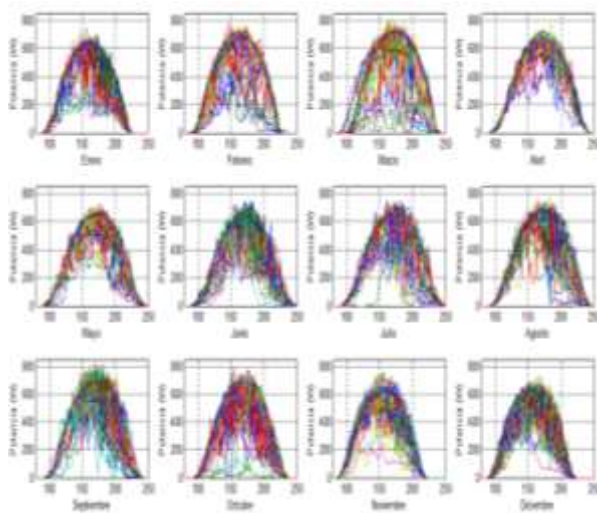


Figura 1 Perfiles de generación mensuales

De la figura 1 se observa que los perfiles de generación presentan características diferentes cada mes. Es posible mediante el empleo de la metodología propuesta identificar el tiempo de generación, la cantidad de nubes y su duración, la energía producida día con día, la potencia máxima de generación, etc. La Tabla II muestra los parámetros obtenidos de los perfiles de generación de la figura 4. Con referencia a la cantidad de nubes los meses de junio y septiembre son los que presentan el mayor número de estas, mientras que febrero y mayo los que menor cantidad de nubes registran. Dado que la región donde se encuentra el sistema fotovoltaico presenta el temporal de lluvias de junio a octubre y el de estiaje de noviembre a mayo, los resultados encontrados corresponden al comportamiento climatológico de la región.

Así mismo, el tiempo de duración del paso de las nubes tienen el mismo comportamiento para los meses con mayor cantidad de nubes, mientras que febrero y abril presentan el menor tiempo de duración del paso de las nubes.

Para el caso de la energía producida, los meses de marzo a mayo alcanzaron las mayores producciones energéticas, mientras que enero y diciembre las menores aportaciones de energía. Lo anterior puede correlacionarse con las horas de generación de energía, ya que los meses de otoño e invierno cuentan con menor aportación de luz solar, mientras que los meses de primavera y verano cuentan con mayor cantidad de luz solar, esto puede verificarse en los tiempos inicial y final de producción.

Parámetros	Energía	P_{max}	T_{Pmax}	$T_{inicial}$	T_{final}	Nubes	$T_{duración}$
	(kWh)	(W)	(Hrs)	(Hrs)	(Hrs)	(Cant)	(Hrs)
Enero	112.91	744	13.77	7.61	18.76	531	80.08
Febrero	113.74	776	13.54	7.50	19.04	432	69.92
Marzo	133.53	817	14.16	7.93	19.89	533	81.83
Abril	138.62	799	14.43	7.73	20.34	490	68.50
Mayo	132.73	726	14.35	7.53	20.46	462	77.08
Junio	112.56	746	14.18	7.50	20.33	609	100.33
Julio	120.28	746	14.49	7.67	20.53	498	91.50
Agosto	127.20	778	14.62	7.72	20.17	531	84.75
Septiembre	124.17	827	14.33	7.84	19.88	608	93.92
Octubre	113.95	794	13.91	8.03	19.61	555	93.08
Noviembre	112.50	760	12.96	7.16	18.39	471	72.92
Diciembre	110.33	731	12.93	7.47	18.45	552	87.42

Tabla 3 Especificaciones de los sistemas fotovoltaicos

Agrupamiento

Con los parámetros obtenidos de los perfiles de generación fotovoltaica, se pueden agrupar dichos perfiles a partir de criterios de agrupación.

Para este fin es empleado el método de agrupamiento k-medias, el cual se basa en particionar un grupo de n observaciones en k grupos en el que cada observación pertenece al grupo cuyo valor medio es más cercano (Hartigan y Wong, 1979). Para el caso que se presenta se han propuesto dos tipos de agrupamientos mensual y anual. El agrupamiento mensual considera la integración de grupos a partir únicamente de los perfiles correspondientes a cada mes. El agrupamiento anual toma en cuenta la cantidad total de días del año y los integra a partir de un criterio específico. En la aplicación del método de k-medias se han considerado cuatro grupos ($k=4$) para agrupar los perfiles de generación a partir de la cantidad de nubes registradas con la metodología propuesta. Los cuatro grupos se identificaron como Soleado, Semi-soleado, Semi-nublado y Nublado. A partir de un programa desarrollado en Matlab con la metodología implementada, se realizaron las simulaciones hasta alcanzar la convergencia del método k-medias. Las figuras 5 a 8 muestran los agrupamientos del tipo de día y su comparación entre mensual y anual.

Tipo de día: Soleado



Gráfico 3 Comparación de agrupamiento en día soleado

Tipo de día: Semi-Soleado

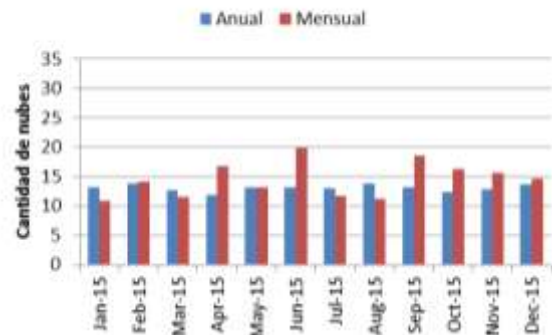


Gráfico 4 Comparación de agrupamiento en día Semi-soleado

Tipo de día: Semi-Nublado

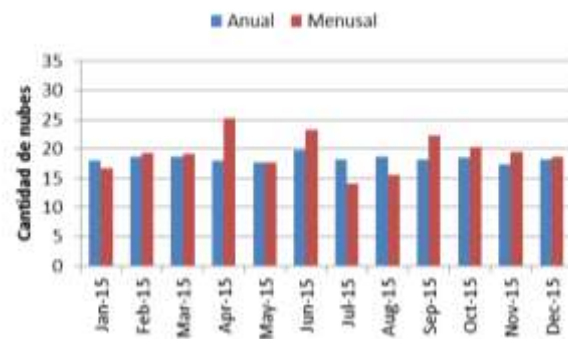


Gráfico 5 Comparación de agrupamiento en día Semi-nublado

Tipo de día: Nublado

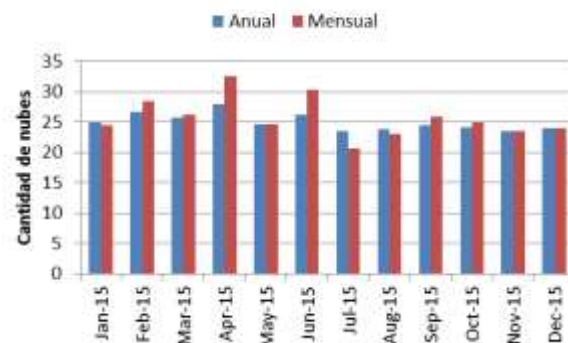


Gráfico 6 Comparación de agrupamiento en día nublado

Los gráficos 3 a 6 muestran información comparativa entre los agrupamientos mensual y anual bajo el criterio de cantidad de nubes. Para el tipo de día soleado del gráfico 3, se puede observar que el mes de septiembre no aporta días soleados cuando el agrupamiento anual se realiza. Esto se debe a que en este mes en particular la cantidad mínima de nubes por día es mayor de 14, por lo que se agrupan en el como tipo de día Semi-soleado.

Existe una diferencia entre el agrupamiento anual y mensual, tal que los días considerados como soleados contabilizan en 55 y 87, respectivamente. Esto indica que el porcentaje de días soleados depende del tipo de agrupamiento empleado, siendo 15.07% días soleados para agrupamiento anual y de 23.84% para agrupamiento mensual.

La tabla 4 muestra los resultados de los esquemas de agrupamiento mensual y anual, siendo los días Semi-nublados y nublados los que predominan en la región. Esta información obtenida de los registros de perfiles de generación fotovoltaica, permiten identificar posibles impactos de la generación fotovoltaica que sean instalados en la región.

Tipo de día	Agrupamiento			
	Mensual		Anual	
	Días	(%)	Días	(%)
Soleado	87	23.84	55	15.07
Semi-soleado	80	21.92	95	26.03
Semi-nublado	109	29.86	116	31.78
Nublado	89	24.38	99	27.12
Total	365	100.00	365	100.00

Tabla 4 Especificaciones de los sistemas fotovoltaicos

Conclusiones

En este artículo fue presentada una metodología para la obtención de parámetros de sistemas fotovoltaicos a partir del registro de perfiles de generación fotovoltaica. Los parámetros obtenidos permiten mediante el método de agrupamiento k-medias identificar cuatro tipos de días: Soleados, Semi-soleados, Semi-nublados y Nublados. Para el caso de agrupamiento anual solo el 15.07% de los días se consideró Soleado, el 26.03 como Semi-soleado, el 31.78% fue Semi-nublado y el 27.12% como nublado. Por lo anterior, se puede determinar que la metodología de obtención de parámetros de perfiles de generación fotovoltaica y la aplicación del método de k-medias permite indentificar el potencial que pueden tener los sistemas fotovoltaicos interconectados al sistema eléctrico.

Por otro lado, es necesario extender el estudio aquí presentado en un artículo adicional para correlacionar otros parámetros tales como energía generada, potencia máxima alcanzada y tiempo efectivo de operación de sistemas fotovoltaicos.

Referencias

- Reporte de avance de energías limpias, (2016). Secretaria de Energía, México.
- Chicco, G., Cocina, V., & Spertino, F. (2014, September). Characterization of solar irradiance profiles for photovoltaic system studies through data rescaling in time and amplitude. In Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities (pp. 1-6). IEEE.
- Esling, P., & Agon, C. (2012). Time-series data mining. ACM Computing Surveys (CSUR), 45(1), 12.

Shi, J., Lee, W. J., Liu, Y., Yang, Y., & Wang, P. (2012). Forecasting power output of photovoltaic systems based on weather classification and support vector machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(3), 1064-1069.

J. A. Hartigan and M. A. Wong. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* Vol. 28, No. 1 (1979), pp. 100-108

LEY PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL FINANCIAMIENTO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA. DOF 12-01-2012. México.

REGLAMENTO DE LA LEY PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL FINANCIAMIENTO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA. DOF 30-11-2012. México.

Aldo De Sabata, Ioan Luminosu, Dan Mărgineanu, Simona Ilie, Dejan Jovanović, Dejan Krstić (2014). Economics of a Small-Scale, Grid-Connected PV System in Western Romania: an LCoE Analysis. *IEEE*.

T. Venegas, L. Contreras-Aguilar, J. Arroyo-Ledesma, R. J. Betancourt, E. Guerrero-Solis, F. Torres-Romero. (2016) "Times Series Power Flow Studies in Electric Networks with PV interconnected Systems". Reunión Internacional de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales. RVP-AI/2016-EDU-20. *IEEE Sección México*.

<https://enlighten.enphaseenergy.com/> (2017)