

SISTEMA DE ILUMINAÇÃO RESIDENCIAL FOTVOLÁTICA AUTÓNOMO: O CASO DE PERU

Eliseo Juan Zarate Pérez¹

ezarate@i.d.uff.br

Mariana Palumbo Fernandez²

mariana.palumbo@urv.cat

Ana Lucia Torres Seroa Da Motta³

anaseroa@hotmail.com

ÁREA: REABILITAÇÃO

Resumo

As redes descentralizadas de energia renovável, nas quais podem produzir recursos energéticos nas residências, são interessantes para a eficiência energética, reabilitação de residências e redução da dependência da rede elétrica convencional. No entanto, o uso ótimo de geração e armazenamento de essa energia depende crucialmente das características de carga, localização, custos de equipamentos e custos de energia elétrica local. O uso de energia devido à iluminação nas residências representa 19% do consumo residencial no Peru. Neste trabalho, foi avaliada a viabilidade técnica e econômica de um sistema de iluminação para uma residência com energia fotovoltaica, armazenamento em baterias e utilizando lâmpadas de tecnologia LED, localizado na região metropolitana de Lima. Verificou-se que, ao combinar essas tecnologias, o sistema de iluminação pode ser autônomo e oferecer condições ótimas para a iluminação na residência, independentemente da rede tradicional. O retorno típico do investimento para o modelo apresentado é de 10 anos e é economicamente viável com uma taxa de retorno de 8,2% ao ano, para um período de 20 anos.

Palavras-chave: Eficiência energética

Energia fotovoltaica

Iluminação residencial

¹ Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, RJ – Brasil.

² PhD, MSc, arq. Universitat Rovira i Virgili, T – Espanha.

³ PhD, MSc, arq. Prof. Universidade Federal Fluminense, RJ – Brasil.

SISTEMA DE ILUMINACIÓN RESIDENCIAL FOTOVOLTAICA AUTÓNOMO: EL CASO DE PERÚ

Eliseo Juan Zarate Pérez¹

ezarate@i.d.uff.br

Mariana Palumbo Fernandez²

mariana.palumbo@urv.cat

Ana Lucia Torres Seroa Da Motta³

anaseroa@hotmail.com

AREA: REHABILITACIÓN

Resumen

Las redes descentralizadas de energía renovable, las que pueden producir recursos energéticos en las residencias, son interesantes para la eficiencia energética, rehabilitación de viviendas y reducción de la dependencia de la red eléctrica convencional. Sin embargo, el uso óptimo de generación y almacenamiento de esta energía dependen de manera crítica de las características de carga, ubicación, costos de los equipos y costos de la energía eléctrica local. El uso de energía debido a iluminación en las residencias representa el 19% del consumo residencial en el Perú. En este trabajo se ha evaluado la viabilidad técnica y económica de un sistema de alumbrado para una residencia con energía fotovoltaica, con almacenamiento en baterías y utilizando lámparas de tecnología LED, ubicado en la ciudad de Lima metropolitana. Se ha demostrado que, mediante la combinación de estas tecnologías, el sistema de alumbrado puede ser autónomo y ofrecer las condiciones óptimas para la iluminación en la residencia independientemente de la red tradicional. El retorno típico de la inversión para el modelo presentado es de 10 años y es económicamente viable con una tasa de retorno del 8,2% anual, para un periodo de 20 años.

Palabras clave: Eficiencia energética
Energía fotovoltaica
Iluminación residencial

1. Introducción

En las últimas décadas, la demanda eléctrica del sector residencial en Perú ha crecido de manera considerable; en 2016 ésta supuso un 220 % respecto a la de 1990 (MINEM, 2017). El aumento de la demanda, junto con el hecho de que la generación eléctrica se produce, aun hoy, en tiempo real respecto a la demanda (debido al alto costo del almacenamiento), supone una sobreexigencia sobre la capacidad de generación del país sobre todo durante los intervalos de máxima demanda (horas punta) (Tamayo et al., 2016).

Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), la incorporación de energías renovables es la estrategia más rentable y rápida para mejorar la eficiencia energética y a la vez garantizar la seguridad energética (CEPAL et al., 2015). En efecto, las redes descentralizadas de energías renovables, son una estrategia atractiva para la eficiencia y rehabilitación energética de viviendas, así como la reducción de la dependencia de la red eléctrica convencional (Tomc et al., 2016).

Sin embargo, el uso óptimo de generación y almacenamiento de esta energía dependen de manera crítica de las características de carga, ubicación, costos de los equipos y costos de la energía eléctrica local. Debido a que la energía que se utiliza en alumbrado del hogar en Lima metropolitana, representa el 19% del consumo de la energía residencial (ERCUE, 2015), se evaluó la capacidad de producción fotovoltaica y almacenamiento en baterías que se requiere para automatizar el alumbrado de una residencia. Evaluándose el costo-beneficio del sistema para un periodo de 20 años, en base a las tarifas de energía eléctrica, así como en base a las tecnologías para iluminación.

2. Metodología

El presente estudio se centra en analizar el potencial de la energía fotovoltaica para satisfacer la demanda eléctrica de iluminación de una vivienda de Lima metropolitana. Para ello, primero se ha caracterizado su demanda eléctrica de iluminación, teniendo en cuenta la eficiencia de los equipos actuales; luego se definieron las tarifas de electricidad, la capacidad de producción fotovoltaica y el sistema de almacenamiento. Finalmente se realizó el análisis de costo-beneficio del sistema de alumbrado alimentado por energía fotovoltaica.

2.1 Consumo de energía eléctrica

Para cuantificar el consumo eléctrico debido a iluminación de una determinada residencia, es necesario tomar mediciones para obtener el régimen de consumo de energía durante las 24 horas del día, así como el régimen de consumo durante los meses de un determinado año.

2.2 Tamaño de la muestra

Consistió en registrar el consumo de energía eléctrica debido a iluminación por intervalos de una hora, para una residencia con ubicación geográfica de latitud: -11.881 y Longitud: -77.03 en Lima Metropolitana (Perú). En base a las facturas de electricidad, el

consumo mensual de la energía en el hogar analizado se ha mantenido constante durante los últimos 12 meses entre el 2015 y comienzos del año 2016. En ese sentido, se tomó el criterio de realizar las mediciones para la verificación del consumo mensual.

Para determinar el número de días a ser verificados; se utilizó el teorema de límite central, y se presenta en la ecuación 1 (Olaya et al., 2017).

$$n = \frac{NZ^2 p(1-p)}{(N-1)e^2 + Z^2 p(1-p)} \quad (1)$$

en que:

n — es el tamaño de la muestra;

N — es el tamaño del universo;

Z — es la desviación del valor medio, con el nivel de confianza (99%), ($Z=2,575$);

e — es el margen de error máximo que se admite ($e = 0,05$);

p — es la proporción que esperamos encontrar (2 días de 7, p es igual a 0,28).

Para un nivel de confianza del 99% y un error máximo del 5%, n es igual a 6,92. Entonces, se realizaron verificaciones de 7 días durante junio del 2016 (figura 1).

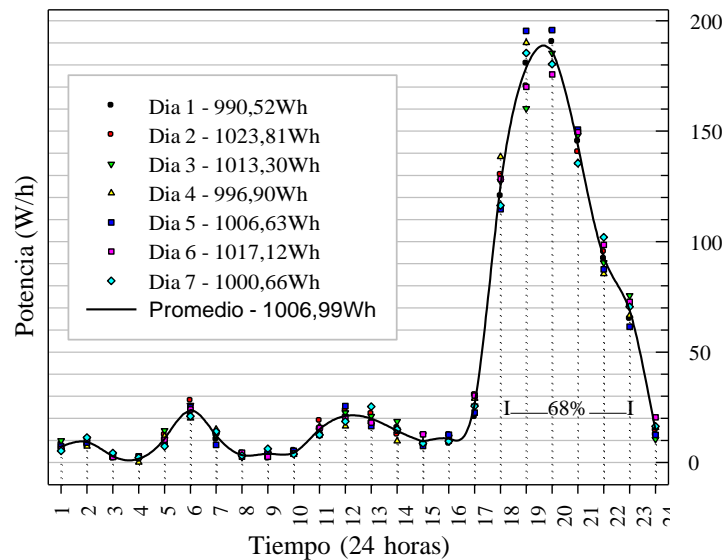


Figura 1: Consumo de energía debido a iluminación con lamparas fluorescentes compactas.

El método de análisis “One Way ANOVA” se utiliza para identificar si son o no significativamente diferentes dos o más grupos de muestras (Gamage et al., 1998).

Tabla 1: Tendencia del consumo de energía debido a iluminación (Wh)

Día	1	2	3	4	5	6	7
Std Dev	58,7	58,4	56,5	58,9	60,7	56,8	57,4
Máximo	190,4	195,4	185,4	190,0	195,7	175,6	185,4
Promedio	13,9	13,6	14,4	15,4	12,6	15,0	14,5

Como resultado del test de igualdad de varianzas se tiene que no hay una diferencia estadísticamente significativa (valor $P = 1,000$ y Factor estadístico $F = 0,017$). Por lo tanto, la muestra representa la tendencia de consumo con un nivel de confianza del 99%.

2.3 Modelo propuesto del sistema de alumbrado residencial

El modelo que se presenta en la *Figura 2*, es un sistema individual autónomo de alumbrado con energía fotovoltaica no conectada con la red.

Para la elección del panel fotovoltaico se toma en cuenta su eficiencia y disponibilidad en el mercado. El tipo fabricado en el volumen más alto con una eficiencia hasta un 20,8% son los paneles con célula solar de silicio policristalino (Green et al., 2015).

Por ser una instalación pequeña, se utiliza los controladores tipo PWM por sus siglas en inglés (Pulse Width Modulated). Éstos pueden conectarse y desconectarse muy rápidamente, permitiendo una carga de baterías muy dinámica (Botteron et al., 2013).

Las baterías de Gel están fabricadas con electrolito gelificado y sellado, éstas no permiten estratificación de ácido y pueden instalarse en cualquier orientación. Tienen una vida media de 10 años, su excelente rendimiento en continuos ciclos de carga y descarga profunda las hacen óptimas para este sistema (González et al., 2012).

Se utilizaron los inversores de onda senoidal pura, debido a que son los más completos, eficientes y precisos, generando generan una energía de igual calidad que la de la red pública (Chowdhury et al., 2013).

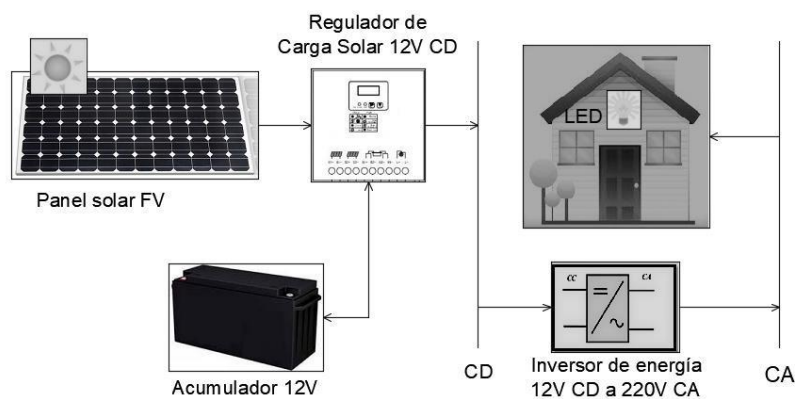


Figura 2: Modelo propuesto: Sistema de alumbrado residencial

2.4 Eficiencia de las lamparas de alumbrado domestico

En la ciudad de Lima, el 54% de las familias usa lamparas fluorescentes compactas (LFC), mientras que el 20.8% usa lamparas incandescentes (LI), el 20.6% usa lamparas fluorescentes (LF), el 3.7% usa lamparas dicroicas (LD) y el 1% usa lamparas LED (ERCUE, 2015). Para determinar la eficiencia de las lámparas de un hogar determinado, es necesario conocer el tipo que se utilizan y su eficiencia lumínica. En este hogar se utilizaba LFC y para calcular el rendimiento se ha utilizado los “W/m²/100lux” de la tabla 2, debido a que el expediente técnico de la vivienda se expresa en esa unidad. En la Tabla 2 se

presenta el análisis del rendimiento de lámparas de iluminación residencial que fue elaborado por (Aman et al., 2013).

Tabla 2: Rendimiento de las lamparas de iluminación residencial.

Tipo de lámpara	Eficiencia (lm/W)	Consumo (W/m ²)	Consumo (W/m ² /100lx)
LI	14,28	28,45	16,86
LF	54,73	9,21	4,51
LFC	30,03	15,28	6,22
LED	75,3	6,22	3,45

Fuente: Adaptado de (Aman et al., 2013)

2.5 Tarifas de electricidad residencial

Las opciones tarifarias residenciales son BT2, BT3, BT4, BT5 A y BT5B. La opción BT5B supone un precio constante de la energía, es decir, el precio de las horas punta es igual al de las horas fuera de punta. En cambio, las opciones tarifarias BT2, BT3, BT4, BT5A presentan doble medición de energía, es decir el precio en horas punta es mayor al precio en horas fuera de punta, básicamente estas opciones tarifarias difieren en la potencia instalada. El precio por kWh/mes (2017) para estas opciones en horas punta y horas fuera de punta es USD 0,47 y USD 0,07 respectivamente (Enel, 2017).

2. 6 Análisis de la capacidad fotovoltaica y sistema de almacenamiento

La capacidad fotovoltaica se calculó utilizando la ecuación 2 (Ergo et al., 2017).

$$E_{panel} = \frac{Q_{solar} * P_{max} * K_{uso}}{I_{ref}} \quad (2)$$

en que:

E_{panel} — es la energía producida por el panel fotovoltaico (kWh);

Q_{solar} — es radiación solar (kWh/m²);

P_{max} — es la potencia máxima del panel fotovoltaico en condiciones estándar (W_p);

K_{uso} — es un factor de condiciones únicas del sitio ($K_{uso} = 0,7$) (Osinergmin, 2014);

I_{ref} — representa la radiación estándar (1 kW/m²).

Para este trabajo, se utilizaron los datos según el Atlas de Energía Solar del Perú, con un promedio de radiación solar de 5.22 kWh/m² (DEP-MEM, 2003).

La capacidad de almacenamiento (G_T , Ah) está dada por la ecuación 3 (Style, 2012).

$$G_T = \frac{E_R}{P_d * V_f} \quad (3)$$

en que:

E_R — es la energía requerida (Wh);

V_f — es la tensión final del sistema de baterías (V); y

P_d — es la profundidad de descarga (%), características de descarga en la Tabla 3.

La capacidad del regulador se elige en base a la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico ($I_{sc, m}$); la cantidad de módulos conectados en paralelo ($N_{m, p}$) y el factor de

seguridad (25%). Entonces, la intensidad nominal del regulador (I_{reg} , A) está dada por la ecuación 4 (Style, 2012).

$$I_{reg} = 1,25 * I_{SC,m} * N_{m,p} \quad (4)$$

La potencia del inversor (P_{inv} , W) está dada por la potencia simultánea en las horas punta ($P_{s, hp}$) y el factor de seguridad (25%), y se expresa en la ecuación 5 (Style, 2012).

$$P_{inv} = 1,25 \left[\sum P_{s, hp} \right] \quad (5)$$

Tabla 3: Parámetros de descarga según el uso y tipo de baterías

Tiempo de Descarga	Voltaje Final (V)	AGM 'Deep Cycle' %	Gel 'Deep Cycle' %	Gel 'Long Life' %
10 horas	10,8	92	87	100
5 horas	10,8	85	80	94
3 horas	10,8	78	73	79
1 hora	9,6	65	61	63

Fuente: (B.V., 2007)

2.7 Análisis de costo-beneficio del sistema

Para evaluar la factibilidad económica se tuvo en cuenta la estructuración tarifaria, considerando las tarifas en horas punta y fuera de punta. Las horas dentro de punta es considerada de 18:00 a 23:00 (Osinermin-Consultas, 2017). Además, se considera el ahorro por el tipo de lamparas que se utiliza. El análisis para determinar el valor actual neto (VAN) se presenta en la ecuación 6 (A.Nottrott et al., 2013).

$$VAN = \sum_{t=0}^T \frac{A - OM}{(1+r)^t} \quad (6)$$

en que:

A — es el valor del consumo de la energía para alumbrado con *LFC*;

OM — es el costo anual de operación y mantenimiento del sistema (*O&M*), constante e igual al 3% del costo de capital (A.Nottrott et al., 2013);

r — es la tasa de descuento;

t — es el año actual;

T es la duración del sistema en años e igual a 20.

Para $t = 0$, OM es igual a los costos de capital incurridos y $A = 0$.

Para $t = 10$, OM es igual *O&M* mas los costos de reemplazo.

3. Resultados

3.1 Reducción de energía utilizando lamparas más eficientes

En este trabajo se sustituyeron las lamparas fluorescentes compactas por la lamparas *LED*. Para un consumo de 1,017 kWh/día con *LFC* (Figura 1) de eficiencia 6,22 W/m²/100lx; utilizando lamparas *LED* de eficiencia de 3,45 W/m²/100lx (Tabla 3), el consumo de energía eléctrica requerida (*ER*) es de 0,414kWh/día.

3.2 Capacidad fotovoltaica para la producción de energía requerida

La energía requerida (ER) es de (0,414kWh/día), usando el promedio de radiación solar de 5.22 kWh/m², con un factor de uso ($K_{uso} = 0,7$) en la ecuación 2, la potencia pico del panel fotovoltaico (P_{max}) es igual a 113,3Wp.

En la Figura 1, el 68% del consumo se realiza en horas punta, la mayor parte de la descarga del sistema de baterías se realiza en 5 horas. Según la tabla 3 para las baterías de Gel con esas características, la profundidad de descarga es de 80% ($P_d = 0,8$), y una tensión final (V_f) de 10,8V. Usando la ecuación 3, se obtiene que la capacidad es igual a 47,92Ah. Por lo tanto, para una autonomía de almacenamiento de dos días, la capacidad de almacenamiento es de 95,84Ah.

El sistema fotovoltaico está compuesto por un módulo de 113,3Wp; entonces, ($N_{m, p}$) es igual a la unidad, donde la corriente de cortocircuito ($I_{sc, m}$) según los datos del fabricante es 7,72A. Así, la intensidad nominal del regulador (I_{reg}) en la ecuación 4 es igual a 9,65A. En la *Tabla 1*, se registra el máximo consumo de 195,74Wh en el día 5, entre las 19h y 20h, como se muestra en la figura 1; es decir, la potencia máxima en horas punta (P_{shp}). Entonces, la potencia del inversor (P_{inv}) en la ecuación 5 es igual a 244,6W.

En la *Tabla 4* se detalla los componentes principales del sistema de alumbrado con energía fotovoltaica.

Tabla 4: Componentes principales del sistema de alumbrado con energía fotovoltaica.

Descripción	Unid.	Datos de diseño	Datos de equipos	Costo (USD)	Periodo
Panel solar	1	113,3Wp, 12V.	120 Wp, 12V.	157,24	Único
Soporte del modulo	1	-	Estándar	25	Único
Batería solar Gel	1	95,84Ah, 12 V	100Ah, 12V	278,87	10 años
Regulador de carga	1	9,65A	10A	48,09	10 años
Inversor Solar 375VA	1	12V, 244,6W	12V /220V, 260W	140,06	Único
Accesorios de instalación	1	-	Varios	88,55	Único
Recursos de instalación	1	-	-	58,00	10 años
Lamparas LED	9	-	220V, 28W	200,50	Único
Total				996,31	-

3.3 Costos de la energía eléctrica para alumbrado

El consumo promedio de energía para alumbrado usando LFC es de 1,007 kWh/día y el 68% se utiliza en horas punta (*Figura 1*). Considerando la facturación mensual de 30 días, 20,54kWh/mes se consume en horas punta y 9,67kWh/mes en horas fuera de punta. Los costos de consumo se detallan en la *Tabla 5*.

Tabla 5: Costo de la energía eléctrica del sistema de alumbrado con LFC.

Descripción	Consumo	Costo unitario (USD)	Costo anual (USD)	Gasto
Consumo en horas punta	20,54kWh/mes	USD 0,47/ kWh	115,85	Anual
Consumo fuera de horas punta	9,67kWh/mes	USD 0,07/ kWh	8,12	Anual
Lamparas fluorescentes compactas	9 unidades	USD 9,28 / unid	92,80	4 años

3.4 Análisis de costo-beneficio

El valor del ahorro es la energía utilizada para iluminación (E_I), con un valor de USD123.27 y el ahorro por la compra de LFC (A_{LFC}) con un valor de USD 92.80 cada 4 años (tabla 5); los costos de capital (CC) son de USD 996.31; el costo anual de operación y mantenimiento del sistema (O&M) es de USD 29.89 año; y el único costo de reemplazo (CR) a 10 años es de USD 384.96. El valor neto actual (VAN) se presenta en la figura 3.

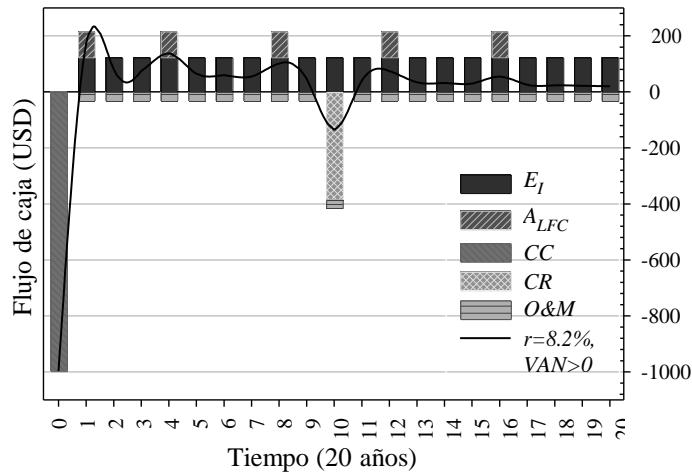


Figura 3: Valor presente neto durante la vida del proyecto (VAN).

Conclusiones

El retorno típico de la inversión, para el sistema de alumbrado con energía fotovoltaica utilizando lámparas de tecnología LED, es de 10 años. Económicamente viable con una tasa de retorno del 8,2% anual, para un periodo de 20 años.

El sistema no genera ningún costo adicional en las instalaciones eléctricas, debido a que la energía proveniente del sistema es equivalente a la energía de la red pública.

Mediante el estudio, se ha demostrado reducción del consumo en un 22,5% de la energía eléctrica de la red pública, para el caso presentado.

Probablemente, estas iniciativas demostrarían una oportunidad para la rehabilitación energética de residencias, debido a que, según el estudio de APEIM, el 74,7% de las residencias son del tipo horizontal en Lima metropolitana (Apeim, 2017), otras condiciones favorables para la implementación del modelo.

Agradecimientos

CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), por la concesión de becas.

Bibliografía

(1) Energy dispatch schedule optimization and cost benefit analysis for grid-connected,

- photovoltaic-battery storage. *Renewable Energy*, 55, 230–240.
- (2) Aman, M. M., Jasmon, G. B., Mokhlis, H., & Bakar, A. H. A. (2013). Analysis of the performance of domestic lighting lamps. *Energy Policy*, 52, 482–500.
 - (3) Apeim. (2017). Niveles Socio Económicos. Recuperado 12 de noviembre de 2017, de <http://apeim.com.pe>
 - (4) B.V., V. E. (2007). *Energía sin Límites*. Recuperado de <http://www.aguidrovert.com>
 - (5) Botteron, F., Carballo, R., Nunez, R., Quintana, A., & Fernandez, G. (2013). High Reliability and Performance PWM Inverter. *IEEE Latin America Transactions*, 11(1), 505–511.
 - (6) CEPAL, MINEM, A. (2015). *Recomendaciones de Políticas de Eficiencia Energética Regionales*. Recuperado de <https://www.iea.org>
 - (7) Chowdhury, A. S. K., Shehab, M. S., Awal, M. A., & Razzak, M. A. (2013). Design and implementation of a highly efficient pure sine-wave inverter for photovoltaic applications. In *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)* (p. 1–6). IEEE.
 - (8) DEP-MEM. (2003). “Atlas de Energía Solar del Perú”. Recuperado de <http://dger.minem.gob.pe>
 - (9) Enel. (2017). *Tarifas eléctricas*. Recuperado de <http://www.eneldistribucion.pe>
 - (10) ERCUE. (2015). *Estudio del mercado de iluminación en el Perú*. Recuperado de <http://united4efficiency.org>
 - (11) Ergo Pikas, Jarek Kurnitski, Martin Thalfeldt, Martin Thalfeldt, L. K. (2017). Cost-benefit analysis of nZEB energy efficiency strategies with on-site photovoltaic generation. *Energy*, 128, 291–301.
 - (12) amage, J., & Weerahandi, S. (1998). Size performance of some tests in one-way anova. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 27(3), 625–640.
 - (13) onzález, I., Ramiro, A., Calderón, M., Calderón, A. J., & González, J. F. (2012). Estimation of the state-of-charge of gel lead-acid batteries and application to the control of a stand-alone wind-solar test-bed with hydrogen support. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(15), 11090–11103.
 - (14) reen, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(1), 1–9.
 - (15) INEM. (2017). Ministerio de Energía y Minas - Electricidad. Recuperado 5 de setiembre de 2017, de <http://www.minem.gob.pe>
 - (16) Olaya, J. L. C., Salazar, C. P., Restrepo, S. M. V., Carrascal, C. A., & Echeverry, L. L. G. (2017). El método de costos estándar alineado a pequeñas industrias manufactureras del área metropolitana del valle de Aburrá. *FACE: Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, 16(2), 54.
 - (17) sinergmin. (2014). *Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria*. Recuperado de <http://www2.osinerg.gob.pe>
 - (18) sinergmin-Consultas. (2017). Osinergmin-Consultas electricidad-Facturación. Recuperado 23 de noviembre de 2017, de <http://www.osinergmin.gob.pe>
 - (19) Style, O. (2012). *Energía solar autónoma : planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. Itaca Appropriate Technology.
 - (20) Tamayo, Jesús; Salvador, Julio; Vásquez, A. y C. V. (Editores) (2016). *La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país*. Lima, Perú.
 - (21) Tomc, E., & Vassallo, A. M. (2016). The effect of individual and communal electricity generation, consumption and storage on urban Community Renewable Energy Networks (CREN): an Australian case study. *doi.org*, 11(0).