

## Estudio para la generación de energía por un sistema con paneles solares y baterías

Study for power generation by a system with solar panels and batteries

MSc. Edwin Espinel-Blanco<sup>1</sup>, MSc. Eder Norberto Florez-Solano<sup>2</sup>, MSc. Jhon Erickson Barbosa-Jaimes<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación GITYD, Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-4479-2874>, Email: [eespinelb@ufpso.edu.co](mailto:eespinelb@ufpso.edu.co)

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Ingenierías Aplicadas para la Innovación, Gestión y Desarrollo INGAP, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia, <https://orcid.org/0000-0003-2527-0413> Email: [enflorezs@ufpso.edu.co](mailto:enflorezs@ufpso.edu.co)

<sup>3</sup> Grupo de Investigación en GESTINDUSTRIALES EOCA, Universidad Nacional a Distancia, Colombia, <https://orcid.org/0000-0001-7890-2678>, Email: [jhebar@hotmail.com](mailto:jhebar@hotmail.com)

Como citar: E. Espinel, E. Norberto y J. E. Barbosa, "Estudio para la generación de energía por un sistema con paneles solares y baterías", *Revista Ingenio*, vol. 17, n°1, pp. 9-14, 2020, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642x.2392>.

Fecha de recibido: 18 de julio de 2019  
Fecha aprobación: 11 de noviembre de 2019

### RESUMEN

#### Palabras claves:

Energía, fotovoltaica, generación, sistema híbrido, solar.

En el presente trabajo se estudió el comportamiento de un sistema para la generación de energía eléctrica a través de una matriz de paneles solares y un banco de baterías. El estudio se fundamenta en la simulación de los modelos matemáticos definidos en la literatura para la generación de energía por medio de paneles solares fotovoltaicos y del estado de carga y suministro de energía en el banco de baterías. Para el desarrollo del estudio se programaron los modelos matemáticos de los paneles solares y las baterías en el software libre Pyhton. Se observó la incapacidad del sistema para garantizar la carga de las baterías al tiempo que se utilizan los paneles para suministrar la energía requerida para satisfacer la demanda, de igual forma, se dificulta el uso de las baterías durante los periodos en los cuales no hay disponibilidad del recurso solar. Se evidenció la dificultad del sistema para satisfacer una demanda específica cuando solo se considera la generación de los paneles o la carga aportada por las baterías de forma individual.

### ABSTRACT

#### Keywords:

Energy, photovoltaic, generation, hybrid system, solar.

In the present work the behavior of a hybrid system for the generation of electrical energy through a matrix of solar panels and a battery bank is studied. The study is based on the python simulation of the mathematical models defined in the literature for power generation by means of photovoltaic solar panels and the state of charge and power supply of the batteries. The difficulty of a simple system to guarantee the charge of the batteries through the use of solar panels is evident, while they are supplying energy to satisfy a required demand, likewise, it is difficult to use the batteries to supply energy during periods in which which there is no availability of the solar resource. The greater reliability of a hybrid system that allows alternating the power supply through photovoltaic generation and the charge stored in the batteries to satisfy a required demand is demonstrated.

### 1. Introducción

La demanda de energía en el mundo ha causado problemas de confiabilidad y seguridad para los sistemas de generación y suministro de electricidad. Uno de los desafíos más importantes en la producción de energía actualmente, es la disminución del impacto ambiental, ocasionado por la fuente de generación empleada [1].

En los últimos años las preocupaciones sobre la disminución de las reservas de combustibles fósiles, así, como el calentamiento global y la contaminación ambiental causada por su uso a través de las distintas fuentes de energía convencionales, han generado gran preocupación a nivel mundial. La creciente demanda de energía para satisfacer los requerimientos del consumo

mundial y la preocupación por el impacto ambiental asociado a las fuentes tradicionales empleadas en la generación de energía a base de combustibles fósiles, ha creado nuevas expectativas para la aplicación de fuentes de energía limpias, inagotables, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente [2].

Según los estudios sobre los efectos ocasionados por el cambio climático, para satisfacer la demanda mundial de forma sostenible es necesario adoptar medidas que garanticen la innovación y el desarrollo de avances tecnológicos que aumenten la capacidad para transformar y generar energía con mayor eficiencia. Es prioritario fortalecer los instrumentos políticos basados en la colaboración para generar cambio en el sector de

producción de energía a nivel mundial [1].

Los recursos energéticos renovables como la energía solar, eólica, biomasa, hidroeléctrica y mareomotriz, son las fuentes más importantes para proporcionar energía limpia y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero para el desarrollo sostenible. La adopción de políticas para el desarrollo sostenible a nivel mundial pronostica que para el año 2040, la matriz energética será la más diversificada alguna vez vista. Se proyecta una creciente participación de las energías renovables en el suministro total de electricidad a nivel mundial [3].

La diversificación de la matriz energética mundial ocasionará intermitencia en las fuentes de suministro de energía en la red, por lo cual, para mitigar la dinámica negativa que puede desencadenar el incremento de las energías alternativas como la eólica y la fotovoltaica, se requiere una reserva flexible de generación de energía con nuevas estrategias de implementación que permitan satisfacer las cargas demandadas [4].

Adicional al incremento en la demanda global de electricidad existen aún problemas sin resolver en pleno siglo XXI. La gran mayoría de la población mundial vive en los países en desarrollo, en los cuales, más de un tercio de las poblaciones están ubicadas en zonas rurales sin acceso a formas comerciales de energía. El acceso a la energía es una tarea compleja, dado que la mayoría de aldeas o veredas no tienen permisos de construcción y están ubicadas en lugares remotos y/o en terrenos montañosos donde las barreras de acceso imposibilitan la interconexión a los sistemas de distribución de energía [5].

Las energías renovables como la radiación solar y eólica, al igual que las alternativas como el biogás, se convierten en la opción para atender las zonas rurales no interconectadas al sistema. Estas fuentes de energía no convencionales posibilitan disminuir los costos de electricidad para grandes consumidores, sin embargo, obligan a mejorar la flexibilidad de los sistemas de generación de energía, dado que estas fuentes siguen los patrones climáticos y no consideran la carga en la demanda, lo que se conoce como suministro intermitente [6].

El suministro intermitente no se puede almacenar a gran escala de una manera económicamente viable, por lo que, las tecnologías de suministro intermitente como las fuentes de generación de energía alternativa o renovable, plantean un desafío importante para el

balance del sistema de energía en tiempo real, donde, además de la variación del lado de la demanda, también existe una variación del lado de la oferta [7].

## 2. Metodología

Se modeló el comportamiento de una matriz de paneles solares fotovoltaicos y un banco de baterías, para verificar la capacidad del sistema en cumplir con la carga requerida para una determinada aplicación. Como lo muestra el esquema representado en la figura 1, un sistema híbrido en este caso integrado por una serie de paneles solares y un banco de baterías para satisfacer una demanda específica de consumo de energía eléctrica en una ubicación geográfica determinada. El sistema puede operar con la generación de los paneles en suministro directo y con la posibilidad de combinar la generación con la carga de las baterías.

Se utilizó el software de acceso libre Python, para simular la capacidad de generación del sistema híbrido de generación de energía. Acorde a las características de los paneles seleccionados a utilizar y a las propiedades del lugar donde se realizará la instalación del sistema como radiación y temperatura, se verifica la capacidad para cumplir los requerimientos de demanda para una aplicación particular.

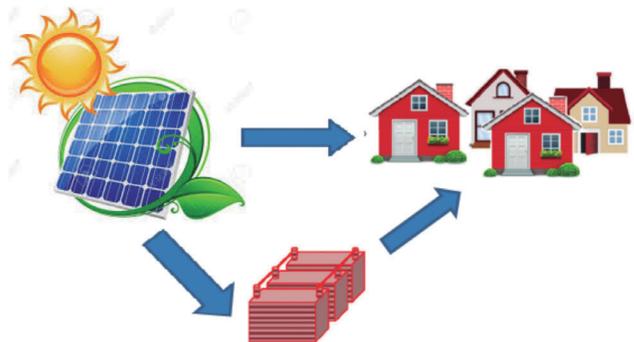


Figura 1. Esquema del sistema generación de energía

### 2.1 Dominio y modelo matemático

Para la simulación de la respuesta del sistema híbrido conformado por paneles solares y baterías, en generar energía eléctrica para satisfacer una carga específica, inicialmente se definieron los modelos matemáticos para las condiciones de operación de los paneles y las baterías, acorde a una revisión de literatura.

**Paneles Solares.** Los datos de radiación solar por hora son necesarios para un diseño preciso del sistema híbrido. La potencia de salida de cada panel fotovoltaico, con respecto a la potencia de radiación solar, puede calcularse mediante la ecuación 1.

$$P_{pv}(t) = P_{R,PV}(t) \times \left( \frac{R}{R_{ref}} \right) \times \left[ 1 + N_T \times (T_c - T_{ref}) \right] \quad (1)$$

Donde:

$P_{pv}$  = potencia generada por cada panel fotovoltaico

$P_{(R,PV)}$  = potencia nominal de cada panel.

$R$  = radiación solar en el sitio

$R_{ref}$  = radiación solar en condiciones de referencia, generalmente 1000 (w=m2)

$T_{ref}$  = temperatura del panel en condiciones de referencia, generalmente 25°C

$N_T$  = es el cociente de temperatura del panel fotovoltaico (-3.7x10<sup>-3</sup> (1/(°C))) [8].

La temperatura en la celda  $T_c$ , es calculada por la ecuación:

$$T_c = T_{air} + \left[ \left( (NOCT - 20) / 800 \right) \times R \right] \quad (2)$$

NOCT, es la temperatura de operación normal del panel en grados centígrados.

Baterías. Por causa de los comportamientos aleatorios de paneles fotovoltaicos, la capacidad de las baterías cambia constantemente de manera correspondiente, si está en proceso de carga o aportando a la generación del sistema híbrido. En dicho sistema, el estado de carga (SOC) de la batería se adquiere de la siguiente manera [9].

Cuando la producción total de paneles fotovoltaicos es mayor que la energía de carga, el banco de baterías está en estado de carga. La cantidad de carga del banco de baterías en el momento puede ser obtenida por la ecuación 3.

$$E_{bateria}(t) = E_{bateria}(t-1) \times (1 - \sigma) + \left[ (P_{pv}(t)) \times \eta_{inv} - \frac{E_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \times \eta_{bateria} \quad (3)$$

Donde  $E_{bateria}(t)$  y  $E_{bateria}(t-1)$ , son las cantidades de carga de las baterías en el tiempo  $(t)$  y  $(t-1)$ ,  $\sigma$  es la tasa de autodescarga por hora,  $\eta_{inv}$  indica la eficiencia del inversor,  $E_{load}(t)$  es la demanda de carga y  $\eta_{bateria}$  es la eficiencia de carga de la batería.

Cuando la producción total de paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas es menor que la demanda de carga, el banco de baterías está en estado de descarga. Para el desarrollo del presente trabajo se consideró que la eficiencia de descarga de las baterías es 1. Por lo tanto, la cantidad de carga del banco de baterías en el momento, se puede obtener mediante la ecuación 4.

$$E_{bateria}(t) = E_{bateria}(t-1) \times (1 - \sigma) - \left[ \frac{E_{load}(t)}{\eta_{inv}} - (P_{pv}(t)) \times \eta_{inv} \right] / \eta_{inv} \quad (4)$$

Para objeto de este estudio, son ignorados los efectos de la temperatura sobre las baterías.

Confiabilidad de sistema. Está relacionada con la capacidad de suministrar la energía (LPSP), definida por un valor entre 0 y 1, un LPSP de 1, significa que la carga nunca estará satisfecha y un LPSP de 0, significa que la carga siempre será satisfecha durante período específico de tiempo. LPSP se define mediante la siguiente ecuación:

$$LPSP = \frac{LPS(t)}{E_{load}(t)} \quad (5)$$

Donde  $E_{load}(t)$ , es la carga demanda para el sistema y LPS(t), es la pérdida de suministro la energía igual a:

$$LPS(t) = E_{load}(t) - E_{gen}(t) \quad (6)$$

$E_{gen}(t)$ , es la energía generada por el sistema.

## 2.2 Implementación en Python

Se realizó el modelado del sistema híbrido para generación de energía eléctrica, utilizando librería numpy de Pytohn. En la figura 2, se muestra un diagrama de flujo que representa la estructura del modelo realizado para la simulación del sistema híbrido de generación de energía con paneles solares y banco de baterías.

Los datos de radiación y temperatura se organizaron en un archivo en Excel, conteniendo la información de las 24 horas del día para los 365 días del año. La información fue procesada utilizando el módulo pandas de pyhton generando dataframe para cada conjunto de datos.

El mismo procedimiento se realizó para generar el dataframe de la carga generando una matriz de 24 filas por 365 columnas, tanto para la carga como para la radiación y temperatura.

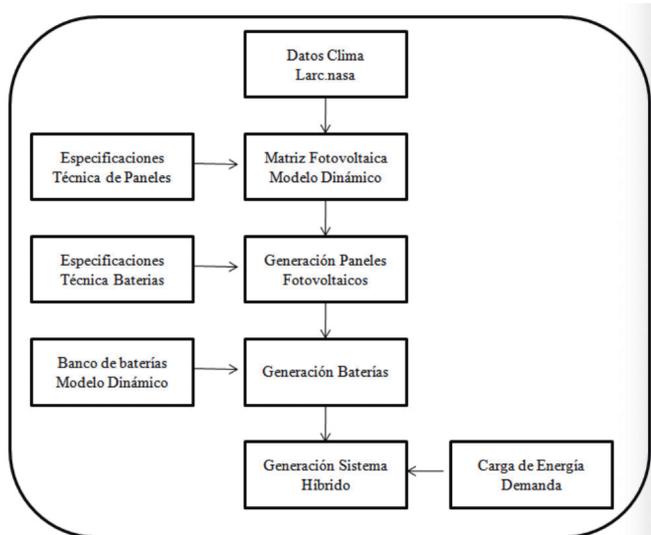


Figura 2. Diagrama de flujo modelo sistema híbrido

Se programó el algoritmo para calcular la potencia generada por cada panel, la demanda y el aporte de las baterías durante cada hora del día. Se desarrolló un main, para trabajar desde python y graficar los resultados que son objeto de análisis.

### 2.3 Datos para la simulación

Los datos de radiación y temperatura fueron tomados de la aplicación de la NASA para la predicción de los recursos energéticos mundiales (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources) [10]. Se descargaron para la ubicación específica los datos de todo un año de radiación solar y temperatura a través de [10].

Las características de cada panel considerado para el estudio se presentan en la tabla (1).

Tabla 1. Características de paneles

Característica	Panel 1	Panel 2	Panel 3
$P_{R,PV}$	3000 W	500W	600W
$NOCT$	49 °C	50°C	49°C
$T_{ref}$	25°C	25°C	25°C
$N_T(1/°C)$	$-3.7 \times 10^{-3}$	$-3.7 \times 10^{-3}$	$-3.7 \times 10^{-3}$

Las eficiencias del inversor y la batería utilizadas para el estudio, se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Características de paneles

Característica	Panel 1
$\eta_{bateria}$	0.87
$\eta_{inv}$	0.92

### 3. Resultados

El modelo desarrollado permite obtener la demanda para cada día del año para cualquier ubicación geográfica. Para objeto de análisis de la demanda de carga de energía eléctrica, de la generación y el comportamiento de los paneles fotovoltaicos y las baterías, se consideró los datos correspondientes a las primeras 144 horas equivalentes a 6 días, con objeto de poder analizar las gráficas obtenidas. En la figura 3, se presenta la demanda para los primeros 6 días y en la figura 4, la generación total para el mismo periodo de los tres paneles solares.

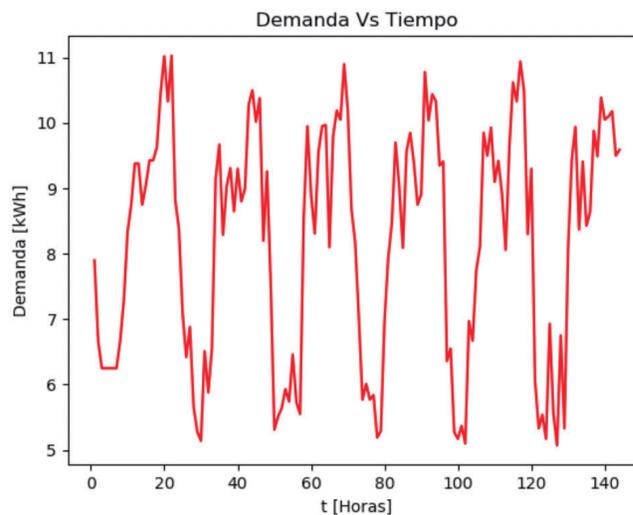


Figura 3. Demanda total de energía

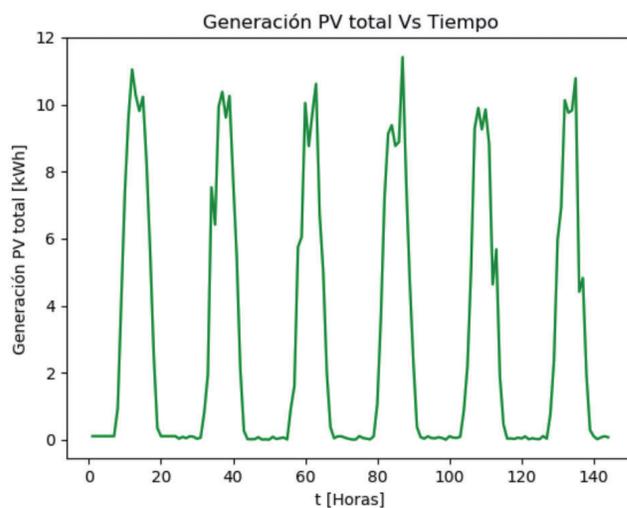


Figura 4. Generación total de los tres paneles

La figura 5, muestra la generación de energía de cada uno de los tres paneles acorde a sus características técnicas descritas en la tabla 1.

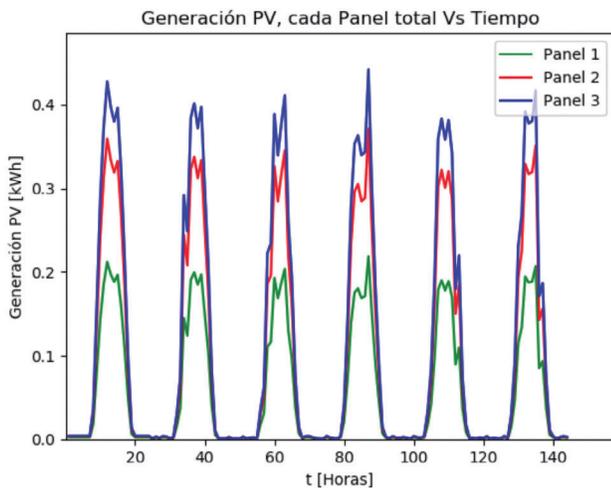


Figura 5. Generación cada panel

En la figura 6, presenta la generación de los paneles instalados, la demanda de energía y la carga de las baterías.

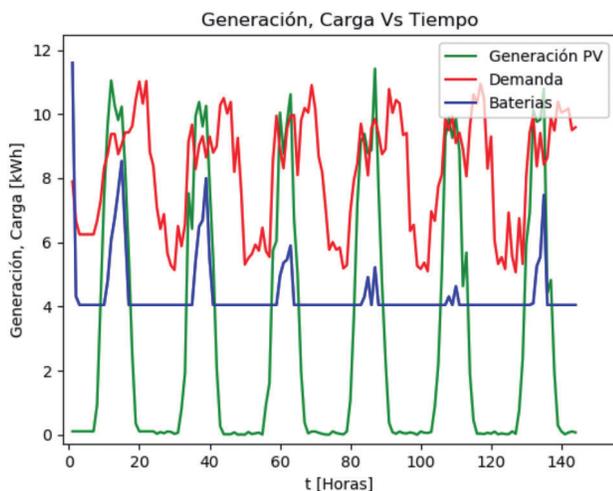


Figura 6. Generación Vs Carga

La figura 7, presenta como funcionaria el sistema al alternar la generación de los paneles con la energía acumulada en las baterías, con el objetivo de satisfacer la demanda.

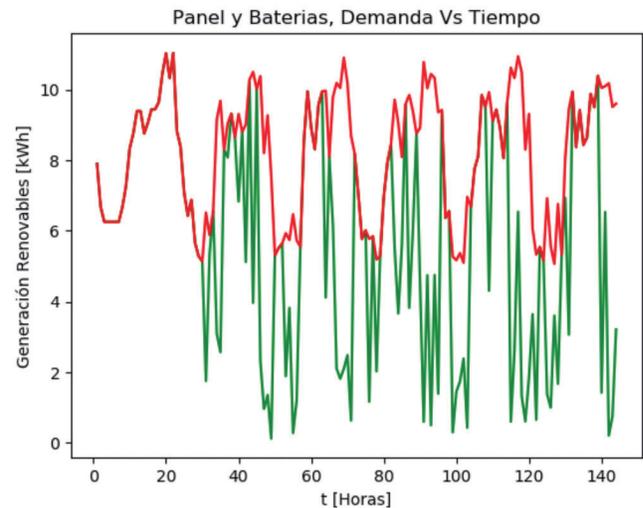


Figura 7. Generación sistema Paneles y baterías Vs Carga

#### 4. Análisis de resultados

De los resultados obtenidos es evidente que a pesar de que los picos de generación de energía por parte de la matriz de paneles es aproximadamente 11 kWh, muy similar a los requerimientos en los picos de la demanda, el arreglo solar es incapaz de soportar la demanda en ciertos periodos de tiempo, como puede observarse en la figura 6. La carga suministrada a las baterías es generada por los paneles en los mismos periodos donde existe mayor demanda, lo que en términos prácticos haría muy difícil cargarlas completamente.

A pesar de que fuese posible cargar las baterías en el rango entre los 6 y los 8 kWh, como lo presenta la simulación sobre su estado de carga observado en la figura 6, dicha carga sería insuficiente para soportar la demanda en las horas donde no existe generación fotovoltaica.

Es posible que alternando la generación fotovoltaica con el suministro de las baterías durante los mismos periodos se pueda soportar la demanda de energía con mayor confiabilidad como lo representa la figura 7, en comparación a que las baterías solo se utilizaran durante la noche cuando no existe el recurso solar.

#### 5. Conclusiones

Un sistema híbrido de generación que considere un matriz fotovoltaicas con banco de baterías, tendría un periodo inicial de cargue del sistema hasta alcanzar la curva de la demanda como se presenta en la figura 7.

Existen picos de generación de energía por los paneles en periodos donde la demanda es inferior, en esos momentos, es indispensable aprovechar los

excedentes de energía generada para cargar al máximo posible las baterías.

El estudio muestra la posibilidad de utilizar un arreglo solar con baterías como un sistema híbrido de generación de energía que alterne el suministro solar con el de la carga acumulada en las baterías durante los mismos periodos, es decir, durante el día puede existir el suministro a través de las baterías al tiempo que los paneles las cargan. Es mayor la confiabilidad del sistema híbrido para el suministro de energía acorde a la demanda, que simplemente el uso de las baterías para el suministro de energía durante el tiempo que no hay disponibilidad del recurso solar.

Es necesario desarrollar un sistema de control que alterne el suministro de energía para tener mejor confiabilidad en el cumplimiento de la demanda o la carga requerida.

## 6. Agradecimientos

Agradecimientos a la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, por el apoyo institucional para realizar el presente estudio.

## 7. Referencias

- [1] Shi, X., Dini, A., Shao, Z., Jabarullah, N. H., Liu, Z. (2019). Impacts of photovoltaic/wind turbine/microgrid turbine and energy storage system for bidding model in power system. *Journal of Cleaner Production* , 845-857.
- [2] Maleki, A., Pourfayaz, F. (2015). Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy* , 471-483.
- [3] Hu, H., Xie, N., Fang, D., Zhang, X. (2018). The role of renewable energy consumption and commercial services trade in carbon dioxide reduction: Evidence from 25 developing countries. *Applied Energy* , 1229-1244.
- [4] Mertens, N., Alobaid, F., Starkloff, R., Epple, B., Gee Kim, H. (2015). Comparative investigation of drum-type and once through heat recovery steam generator during start-up. 144.
- [5] Chauhan, A., Saini, R. (2015). Renewable energy based off-grid rural electrification in Uttarakhand khand and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 662-681.
- [6] Lise, W., van der Laan, J., Nieuwenhout, F., Rademaekers, K. (2013). Assessment of the required share for a stable EU electricity supply until 2050. *Energy Policy* , 904-913.
- [7] European Network of Transmission System Operators for Electricity. (2012). Entsoe. Retrieved from Entsoe: <https://www.entsoe.eu>
- [8] Ismail, M., Moghavvemi, M., Mahlia, T., 2013. Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid
- [9] Belfkira, R., Zhang, L., Barakat, G., 2011. Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit. *Sol. Energy* 85, 100–110.
- [10] NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. Data Access Viewer. Online. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>