

Diseño y construcción de una Microred Fotovoltaica-Hidraulica para suministro de energía del corregimiento de Puerto Salgar-Cundinamarca

Yeison Geovani Garzón Bernal
Estudiante de Maestría en ingeniería
Bogotá, Colombia
yeisong.garzonb@utadeo.edu.co

Resumen-- En la zona de **Cundinamarca Norte** existen aún más de 8400 familias **que no** tienen **electricidad debido** a diversos problemas en el funcionamiento del servicio. Destacan entre estas dificultades el terreno remoto, las condiciones **climáticas adversas**, la falta de tecnología y la pobreza **extrema**. Ante tal panorama, si combinamos las tecnologías disponibles mediante el estudio de las condiciones ambientales, los patrones climáticos a lo largo del año y los informes históricos, se puede crear un diseño efectivo para un modelo de **generación de** electricidad y sustentable según las necesidades el municipio.

El objetivo del proyecto es el diseño de un sistema factible tecnológicamente, híbrido hidráulico fotovoltaico, aislado de la red para el aprovechamiento de una pequeña población rural. Este sistema está dimensionado a partir de un río que se puede aprovechar para realizar el aporte energético necesario y recibe el apoyo de un sistema fotovoltaico y un tanque de baterías. Del mismo modo, el proyecto tiene la finalidad de crear una demanda escalable unitaria la cual será base para una vivienda rural y, a partir de esta, obtener una demanda estandar de la población.

Abstract-- In the northern Cundinamarca area, there are still more than 8400 families that do not have electricity due to various problems in this vital service, among which are: remote terrain, adverse weather conditions, lack of technology and extreme poverty. Given this panorama, if we combine the available technologies by studying environmental conditions, weather patterns throughout the year and historical reports, an effective design can be created for a model of electricity generation and sustainable according to the needs of the municipality.

The objective of the project is the design of a system, technologically feasible, photovoltaic hydraulic hybrid, isolated from the network for the use of a small rural population. This system is sized from a river that can be used to make the necessary energy input and is supported by a photovoltaic system and a battery tank. In the same way, the project aims to create a scalable unit demand which will be the basis for rural housing and, from this, obtain a standard demand of the population.

I. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son cruciales para un desarrollo sostenible, e influyen en importantes aspectos, como lo son los económicos, los ambientales y sociales. Actualmente las zonas aisladas eléctricamente, aquellas donde no llega la red eléctrica o no están conectadas a las grandes redes de los países desarrollados, pueden beneficiarse de los sistemas descentralizados que utilizan energías renovables. En esta propuesta en particular, el uso de la energía hidráulica y solar fotovoltaica puede considerarse como una opción para la generación de electricidad en zonas remotas sin emisiones contaminantes y sin dependencia externa. Es de tomar en cuenta que, desde los últimos años los costos de producción, especialmente en cuanto a paneles fotovoltaicos, se ha visto reducido notablemente debido a su producción a gran escala, a pesar de esto, los rendimientos siguen siendo bajos y los costos relativamente elevados. Por otro lado, las tecnologías utilizadas para el almacenamiento de energía también están evolucionando rápidamente, de tal modo que sus precios disminuyen y la capacidad de almacenaje aumenta, bondades que bien pudieran aprovecharse para nuestra propuesta.

En el presente estudio, se quiere caracterizar un sistema renovable aislado de la red para una pequeña población rural, situada en la provincia Puerto Salgar, lugar con una población aproximada de 1250 habitantes. El diseño del sistema está basado en el caudal bajo el flujo de Río Negro y en la creación de una demanda unitaria por vivienda. Esta demanda es escalable, de tal manera que pueda representar toda la población o incluso otras poblaciones de características similares. A partir de aquí, el sistema propuesto debe asegurar electricidad mediante una base de tecnología hidráulica y el complemento de energía solar fotovoltaica con el uso de baterías.

El principal problema tecnológico de la mayoría de estas instalaciones renovables es la predicción de la electricidad que puede generarse. En este caso, la predicción del caudal del río es complicada ya que está bajo la influencia de los regímenes pluviales de la localización y de la estación anual, variando desde muy húmedo hasta muy seco. En el caso de la predicción de la radiación solar, es más sencilla, y en resumidas cuentas, depende de las coordenadas y la altura del emplazamiento, aunque presenta problemas como la presencia de nubes y la limitación de las horas solares. Debido a estos factores y otros, como pueden ser las paradas de mantenimiento de las instalaciones generadoras, el uso de sistemas de almacenamiento es generalmente imprescindible en los sistemas aislados de la red.

II. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA

La estimación de la demanda energética debe ser lo más exacta posible debido a que a pesar de la existencia de sofisticados modelos matemáticos, esta siempre es incierta. La incertidumbre que genera aumenta con el periodo de la predicción. Dicho de otro modo, existen diferentes métodos de predicción de la demanda, por ejemplo, la predicción de demanda con valores crecientes, predicción de demanda basada en datos económicos, de demanda con valores estimados, predicción de demanda basada en valores de carga específicos y extensión de la red y predicción de demanda con curvas estandarizadas. La precisión de estos modelos no es exacta y por ello se suele proceder a su combinación. Sin embargo, para nuestro estudio, la predicción será llevada a cabo mediante el último método de los que se mencionaron anteriormente.

Esta predicción mediante curvas estandarizadas, está basada en la determinación de la demanda del sistema energético anual del consumo individual o del consumo por grupos. La demanda puede estar dividida en los siguientes grupos:

- Consumo en viviendas.
- Consumo en el sector primario (granjas, bombeo de agua)
- Consumo sector secundario y terciario-servicios (comercios, fábricas, producción).

Los perfiles de consumo varían durante el día, pero también con el tipo de día -laboral o festivo-grupos de consumo y a su vez con la estación del año. Este proyecto está enfocado en una unidad base con un consumo de 1MWh/año por vivienda en dicho grupo. Esto representa una demanda media diaria de 2,74KWh/día. Este valor es bastante pequeño para una vivienda, pero en una situación rural y en un país en desarrollo, el consumo eléctrico es menor y únicamente cubre las necesidades básicas, como podrían ser las que se observan en la siguiente tabla en un día de invierno laboral:

Tipo de carga	Unidades	Potencia	Consumo medio (h)	Factor de simultaneidad	Energía total (kWh)
Lámpara fluorescente compacta	4	20	6	0,6	72
Nevera pequeña	1	130	8	1	1040
Lavadora semiautomática	1	280	1	0,3	84
Radiador eléctrico pequeño con termostato	1	1000	2	1	2000
TV a color de 14"	1	50	4	0,8	160
Radio / Radiocasete	1	15	2	0,6	18
Energía total en un día tipo					3374

Tabla 1 Modelo de consumo energético promedio para un día de invierno laboral. .
Fuente: Programa de Enel Power X – Energías renovables

Como se puede apreciar en tabla precedente, la demanda total para un día laboral de invierno es superior que en verano. De este modo, es realmente sencillo ver cómo se puede superar la demanda media en los meses de invierno,

con simplemente utilizar un pequeño radiador durante varias horas. Los datos de las potencias, horas de uso y factor de simultaneidad han sido obtenidas principalmente de la fuente [1].

La variación de la demanda eléctrica en el sector viviendas, además de los aspectos mencionados con anterioridad, depende principalmente de la localización de la población. Como ejemplo de este hecho, una población situada en el norte con un clima frío tendrá un alto consumo eléctrico en invierno debido a la falta de horas solares y al uso de la calefacción o, por lo contrario, la misma población en una localización desarrollada con un clima tropical tendrá un elevado consumo eléctrico en verano debido al uso de los sistemas de climatización. Además de esto, se ha considerado seis meses de invierno y seis de verano para llegar a una aproximación que resulte confiable para nuestro proyecto.

Debido a todos estos factores, y para contar con una mayor capacidad de predicción, se debe aproximar la demanda según el día. En este caso y al considerar una latitud norte, se ha utilizado la siguiente ecuación de corrección del consumo energético:

$$1) Fd = -3.92 \times 10^{-10} d^4 + 3.2 \times 10^{-7} d^3 - 7.02 \times 10^{-5} d^2 + 2.1 \times 10^{-3} d + 1.24$$

Donde d es el día del año, considerando el primero de enero como $d=1$ para cada año, e incrementándolo para cada día del año, siendo el resultado el que aparece en la siguiente figura:

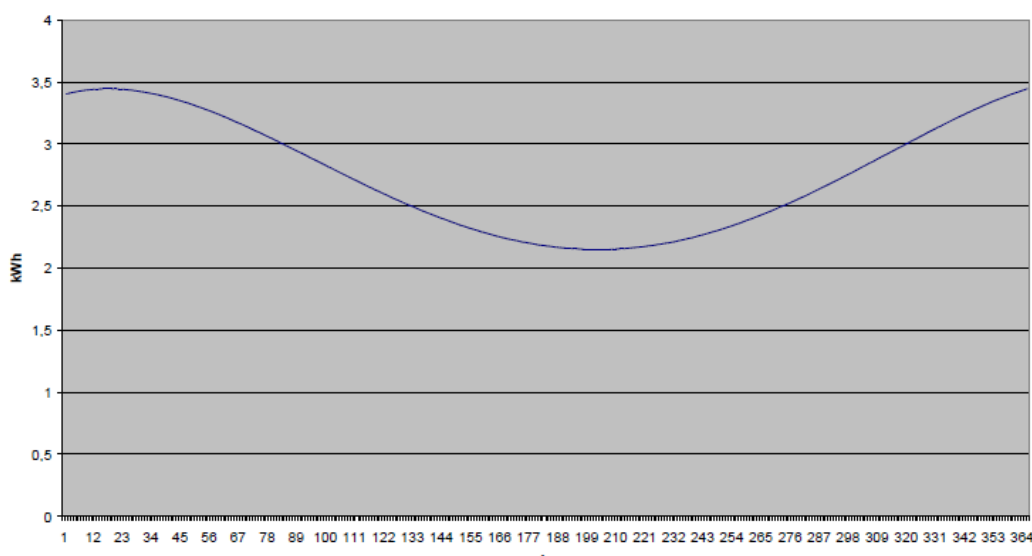


Fig. 2. Demanda corregida anual por unidad base de 1MWh/año.
Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar la variación de la demanda eléctrica donde hay un mayor consumo en los meses de invierno. Se ha considerado un medio rural, de clima subtropical con temperaturas suaves a lo largo del año para obtener un aporte significativo en la demanda.

Dicha población está compuesta por 500 viviendas incluyendo una escuela, una pequeña consulta médica y varios comercios, de los cuales se ha tomado como referencia un consumo tipo vivienda debido a su bajo global impacto en la demanda. Para el caso de la demanda horaria, se utilizarán las curvas estandarizadas por vivienda, con una potencia demanda sobre base de consumo anual de 1MWh/año. Se han generado cuatro curvas estandarizadas para la unidad base. Fundamentalmente, estas curvas muestran los consumos medios de la una unidad base, y en estas se evidencian las diferencia en las cuatro curvas para invierno-laboral, invierno-festivo, verano-laboral y verano-festivo. Los valores de estas curvas están basados en el consumo anual, considerando que los fines de semana la demanda es un 20% mayor que en los días laborables. Las curvas estandarizadas de pueden ver en las figuras que siguen a continuación:

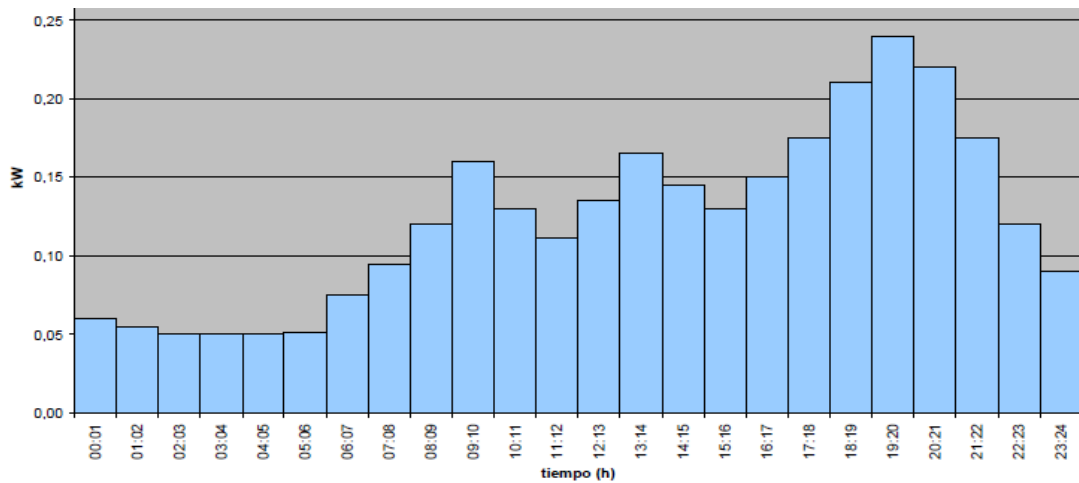


Fig. 3. Demanda día tipo medio de invierno laboral para una unidad base.
Fuente: Elaboración Propia

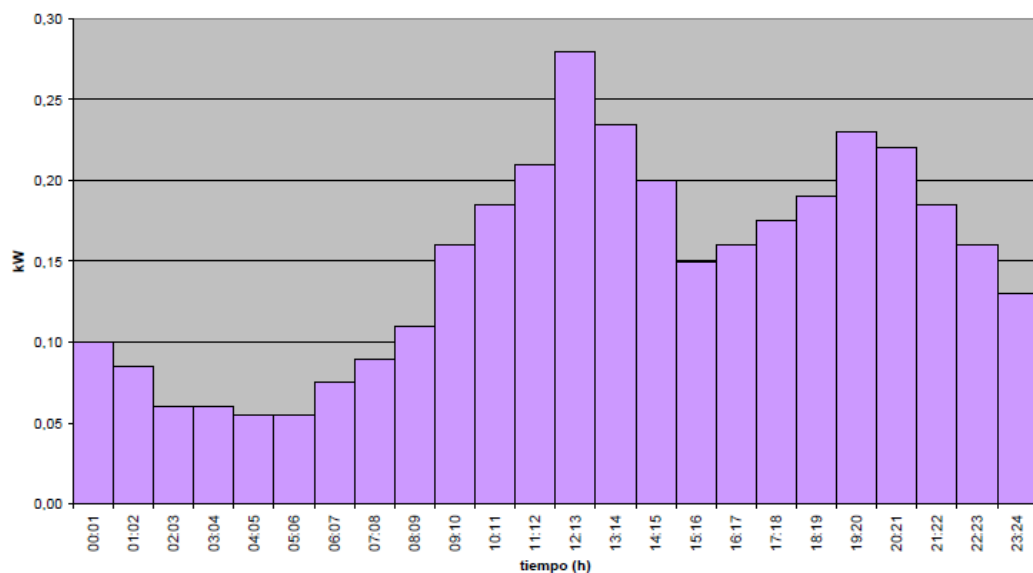


Fig. 4. Demanda día tipo medio de invierno festivo para una unidad base.
Fuente: Elaboración Propia

En las figuras 3 y 4 se aprecia las curvas de consumo energético tanto para un día laboral como para uno festivo en invierno. Se puede evidenciar que la demanda de energía es más alta para el caso de los días festivos.

En las figuras 5 y 6 se observa el patrón de consumo durante un día de verano, y se evidencia que el comportamiento es similar, es decir, que se alcanza la mayor demanda durante los días festivos.

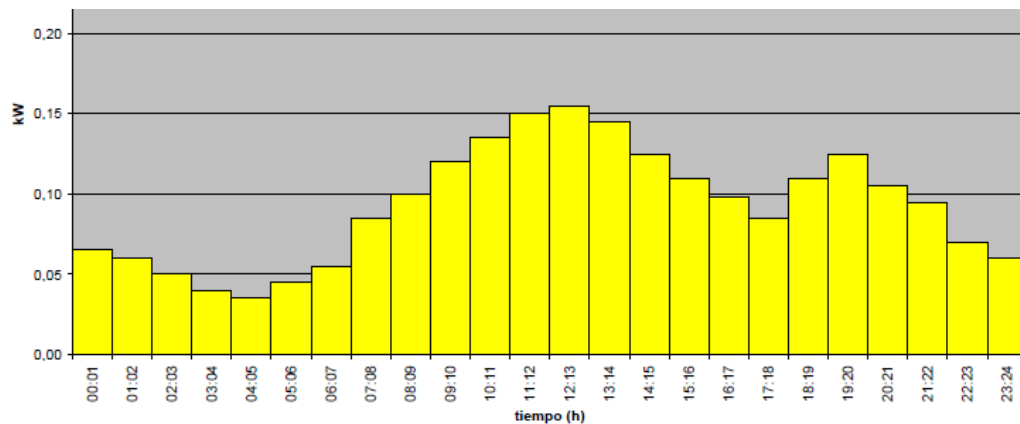


Fig. 5. Demanda día tipo medio de verano laboral para una unidad base.
Fuente: Elaboración Propia

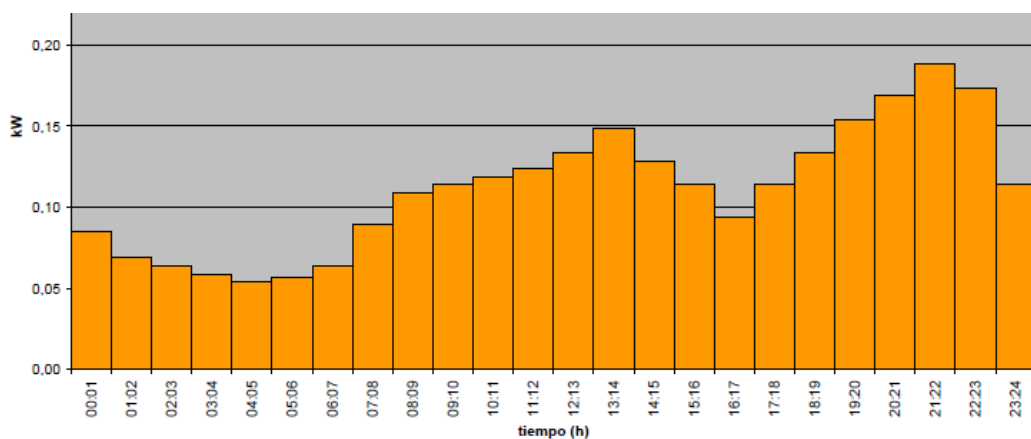


Fig. 6. Demanda día tipo medio de verano festivo para una unidad base.
Fuente: Elaboración Propia

III. INGENIERÍA DESARROLLO MODELO

Tomando en cuenta el panorama descrito con anterioridad, nos proponemos diseñar un sistema capaz de proveer eléctricamente a una pequeña población aislada de la red, mediante un sistema híbrido hidráulico fotovoltaico. Las bases para el diseño están dadas por un río tipo y un consumo eléctrico previsto mediante curvas estandarizadas a partir de la demanda base, variable en el tiempo y escalables para una población rural. Con los datos del consumo y generación hidráulica se diseña el sistema solar para dar soporte eléctrico y para cargar un tanque de almacenamiento capaz, también, de dar soporte en momentos de picos de demanda en las épocas en las que se presentan mayores niveles o lapsos de mantenimiento. De forma resumida, las características del sistema de generación son las siguientes:

- La demanda eléctrica base se cubre mediante energía hidráulica, empleando una mini turbina instalada en una central de caudal fluyente. El sistema solar fotovoltaico debe ser capaz de cargar el sistema de almacenamiento en un tiempo máximo de 20 días en el peor de los casos y dar soporte directo a los consumidores en caso que sea necesario.

- El sistema de almacenamiento debe dar soporte en las horas de máximo consumo eléctrico y deberá estar dimensionado para cubrir o reducir los picos máximos de la demanda.

Según la situación geográfica y estacional, se considera que la instalación se realiza en una zona con inviernos de seis meses de duración y temperaturas moderadas normalmente no inferiores a 0°C, según se puede ver en la tabla de temperaturas mínimas y máximas:

Lat/Long	en	feb	mar	ab	may	jun	jul	agos	sept	octu	novi	dic	media anual
Mínimo (°C)	2,11	3,56	6,73	12,3	16,8	20,7	23,3	22,5	19,2	14,5	9,38	4,25	13
Máximo (°C)	8,18	10,1	13,5	19,2	23,9	27,3	29,4	28,6	26,0	21,2	16,0	10,5	19,5

Tabla 2. Temperaturas máximas y mínimas, situación geográfica y estacional
Fuente: Base de Datos, alcaldía de Pto Salgar Dpto. calidad y medio ambiente.

Además, durante los meses de invierno, hay una alta pluviometría que incrementa notablemente el caudal disponible. El verano, al ser un clima subtropical, es caluroso y se reciben altas temperaturas tal y como se expone en la tabla anterior que ayudan a suplementar el descenso hídrico. Por otro lado se hace pertinente mencionar que, el emplazamiento está aislado de la red eléctrica y a una distancia aproximada de 2,5 Km del río más próximo, un pequeño afluente del río “*Rio negro*”, que a su vez, es el tercer río más largo de Cundinamarca norte lo que podría favorecer en gran medida a lo que se pretende establecer en esta propuesta, debido a que su punto medio como es señalado en la siguiente imagen representa un buen desempeño de este río como elemento generador de energía.

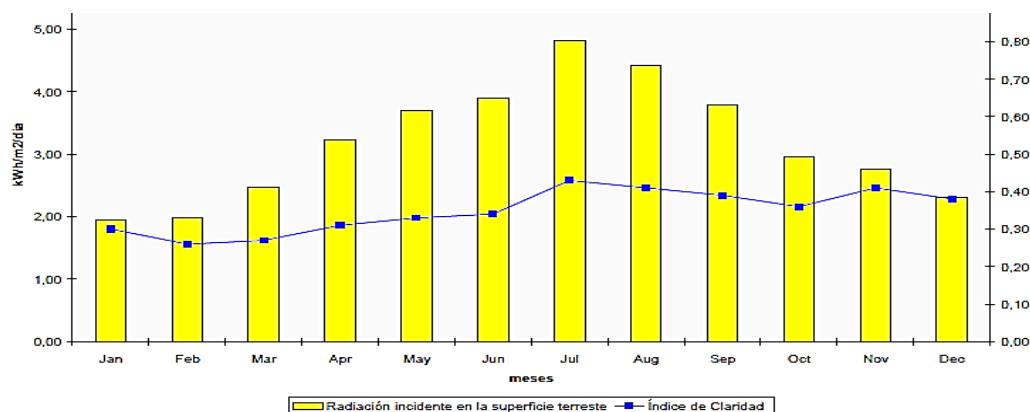


Fig. 7. Representación de la media mensual de la radiación incidente y el índice de claridad en la superficie terrestre plana

Fuente: [3]

Por lo visto en esta representación, la radiación mensual aporta una estabilidad energética siendo su punto medio el mes de julio y por lo tanto sería una fuente la de Río Negro bastante propicia y sostenible durante todo el año.

IV. UBICACIÓN

La localización de la instalación se encuentra en la provincia de Pto Salgar, exactamente en las coordenadas 5°46'13" N 74°28'14" E. Como se ve con mayor exactitud en la figura que sigue a continuación:



Fig. 8. Localización de la instalación
Fuente: [4]

La elección de esta provincia viene dada por la existencia de un plan del gobierno de Cundinamarca para potenciar la electrificación de zonas rurales que incluye a esta zona en particular. Dicho plan empezó con el programa de electrificación municipal (2016-2020), con la intención de abastecer de electricidad a 1,3 millones de personas en las provincias más pobres de este país mediante el uso de fuentes renovables, principalmente mini hidráulica, fotovoltaica. Actualmente este programa ha sido procedido por uno similar basado en la electrificación de pueblos, con el que se pretende abastecer con energías renovables 3,5 millones de hogares para el 2020, continuando con una completa electrificación rural hacia el 2025. Para tener una mejor visualización de estos planes se muestra en la siguiente figura la ubicación de una planta creada para este necesario aporte energético:

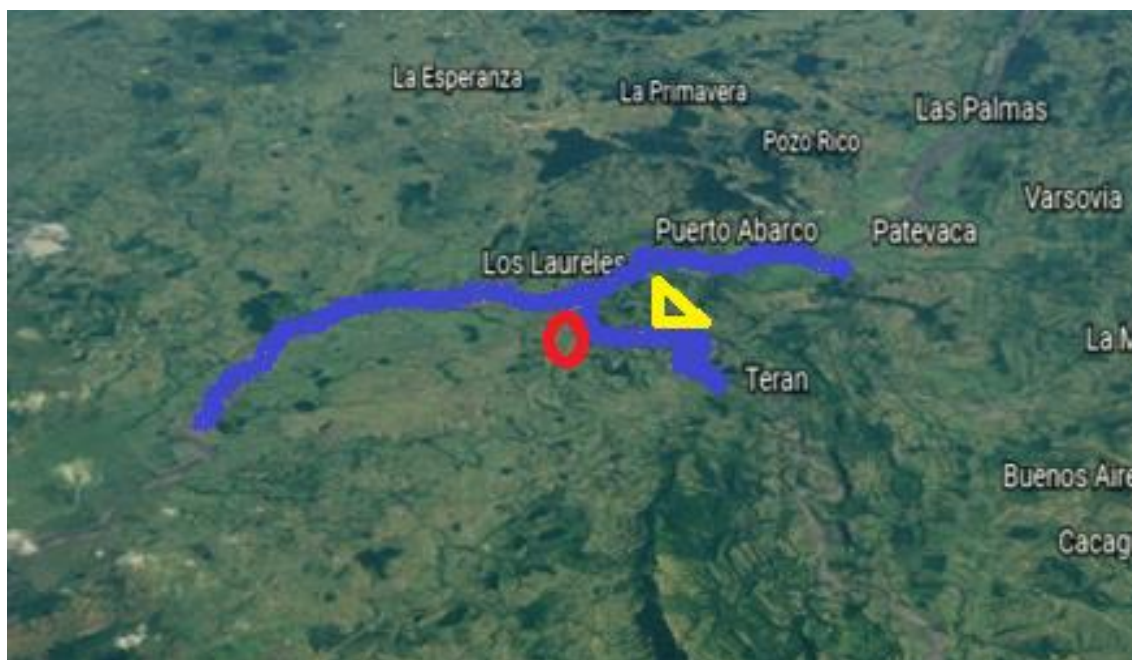


Fig. 9. Localización de la instalación Hidro-Fotovoltaico.
Fuente: [4]

Esta zona señalada también es muy interesante por su climatología, ya que cuenta con un clima subtropical, con inviernos de altas precipitaciones y templados en los cuales la temperatura media en enero varía de 3°C a 8°C. con lo cual se puede generar energía hidráulica durante todo el año un hecho crucial para el desarrollo de esta propuesta. Por otro lado, la radiación solar incidente en la superficie es considerable, pudiéndose utilizar paneles fotovoltaicos durante todo el año, especialmente en verano.

V. EVALUACIÓN DEL RECURSO

La correcta evaluación de los recursos es especialmente importante en este caso, debido a que el sistema es aislado y por tanto no recibe soporte de la red. Los recursos naturales o la climatología son muy variables, por ello su predicción suele ser complicada y se han de tomar un gran número de muestras para poder aproximar la cantidad de energía primaria que puede ser convertida en electricidad. En consecuencia, generalmente se recurre a técnicas estadísticas que controlan datos como el caudal de un río o la radiación solar en una superficie durante años, generalmente diez, que posteriormente se promedian. En este caso se han considerado un recurso hidráulico tipo y un recurso solar que serán explicados a continuación.

Recurso hidráulico

Las centrales de aprovechamiento de energía hidráulica pueden definirse como instalaciones mediante las cuales se obtiene la energía contenida en una masa de agua a una cierta altura, convirtiéndola en electricidad mediante el uso de turbinas. Según el emplazamiento se puede diferenciar dos grandes tipos de central hidráulica. Por un lado, se encuentran las centrales de tipo fluyente en las que el salto es sensiblemente constante y puede considerarse como tal -como es este caso-. Por otro lado, se habla de las centrales con presa donde existe una mayor variación del salto a lo largo del tiempo, dependiendo el salto de la cantidad de agua almacenada. Además de esta clasificación, se debe destacar para este caso la clasificación según potencias. Existen cuatro grupos, graduados de menor a mayor potencia instalada: las centrales micro hidráulicas con una potencia inferior a 1 MW; las centrales mini hidráulicas, que incluyen a las anteriores y son las centrales con una potencia inferior a 10MW; las centrales de media potencia, comprendidas entre los 10 MW y los 50 MW instalados; y para finalizar, las centrales de gran potencia, con potencias superiores a 50MW.

Principalmente las instalaciones hidráulicas dependen de dos factores: la altura del salto y el caudal turbinable, considerando, en este caso, la evolución temporal de ésta última, ya que el caudal se considera constatable. Además, se han de considerar las pérdidas por rendimiento de la instalación. Estos parámetros definirán los costes, beneficios y viabilidad, así como el tipo de tecnología a emplear.

Evaluación del recurso hidráulico

El primer paso consiste en la evaluación del recurso hidráulico que se lleva a cabo en dos etapas. En la primera, llamada de prospección, se obtienen los datos hidrológicos del punto o puntos seleccionados para la instalación hidráulica, y así se analizan sus condiciones y características. La segunda etapa es conocida como evaluación y define las condiciones de la instalación como son el salto bruto y el caudal disponible. A partir de ellas se podría estimar los dos factores elementales de la instalación. Para obtener el potencial energético se consideran dos factores principales: la potencia a instalar y la energía anual producible. Ambos factores dependen del salto, del caudal y de la evolución de éstos al largo de un año. En resumen, en ambas partes se debe tener presente:

- La disponibilidad y variabilidad del recurso hidráulico.
- El tipo de obra civil, requisitos y costes.
- El importe total de la inversión y su viabilidad.
- Los impactos medioambientales.

Caudal

El caudal del río es el factor más variable de toda la instalación y es el resultado de diversos factores tales como la pluviometría de la cuenca y la escorrentía misma. El caudal se define como la cantidad de fluido que pasa por un punto de un río en un tiempo determinado.

Generalmente, se han de tener en cuenta los siguientes caudales.

- Caudal del río (Q_{rio})
- Caudales ecológico (Q_{eco})
- Caudales disponible (Q_{dis})
- Caudal mínimo técnico (Q_{mint})
- Caudal nominal (Q_n)
- Caudal máximo (Q_{max})

Como no se puede turbinar todo el caudal del río porque causaría problemas medioambientales, es obligatorio dejar un Caudal Ecológico (Q_{eco}), que es el mínimo que preserva la vida de la flora y fauna del río y que está generalmente dado para cada río por la Administración competente.

El caudal disponible (Q_{dis}) está definido como la diferencia entre el caudal total del río y el caudal ecológico. Además, es éste el que se considera en los cálculos, así como en este proyecto.

El caudal mínimo técnico (Q_{mint}) indica el caudal mínimo a partir del cual la turbina no puede trabajar de forma efectiva y se para. Este caudal depende de cada tipo de turbina.

El caudal nominal (Q_n) es el caudal de diseño de la instalación y para valores mayores de caudal la turbina no es capaz de admitirlo y lo vierte directamente al río, de modo que su selección es muy importante para conseguir el máximo rendimiento de la instalación, así como una buena relación coste-rendimiento o beneficio. En el caso de utilizar más de una turbina, se puede conseguir un mayor rendimiento ya que se puede trabajar con diferentes rangos de caudales. Por otro lado, el caudal máximo (Q_{max}) es el valor más elevado registrado; generalmente, no es rentable que sea igual al caudal nominal.

La medición del caudal de un río se realiza en las estaciones de aforo y se calculan los mínimos, máximos y medios diarios y se agrupan y elaboran series temporales por años hidrológicos. Los adecuados tratamientos estadísticos de estas series históricas deben ser lo más largas posibles, considerándose un histórico válido de unos 30 o 40

años, y pudiéndose utilizar como mínimo históricos de 10 años, en este caso ver anexo II, ya que históricos de menor duración no reflejan con garantías el caudal del río. Los aforos se dividen en dos grupos: directo e indirecto. El primero, más común para caudales pequeños, contempla los métodos de medición directa utilizando algún aparato como podría ser un molinete. El segundo en cambio, se utiliza para medir grandes caudales cogiendo el nivel superficial del agua del río para obtener el caudal, usando un limnómetro. Hay que destacar que en todas las siguientes representaciones se ha realizado a partir de caudales disponibles.

A partir del tratamiento de los datos de caudales disponibles utilizados, se debe destacar el hidrograma que representa la variación del caudal –disponible- a lo largo de un año hidráulico del río tipo.

HIDROGRAMA

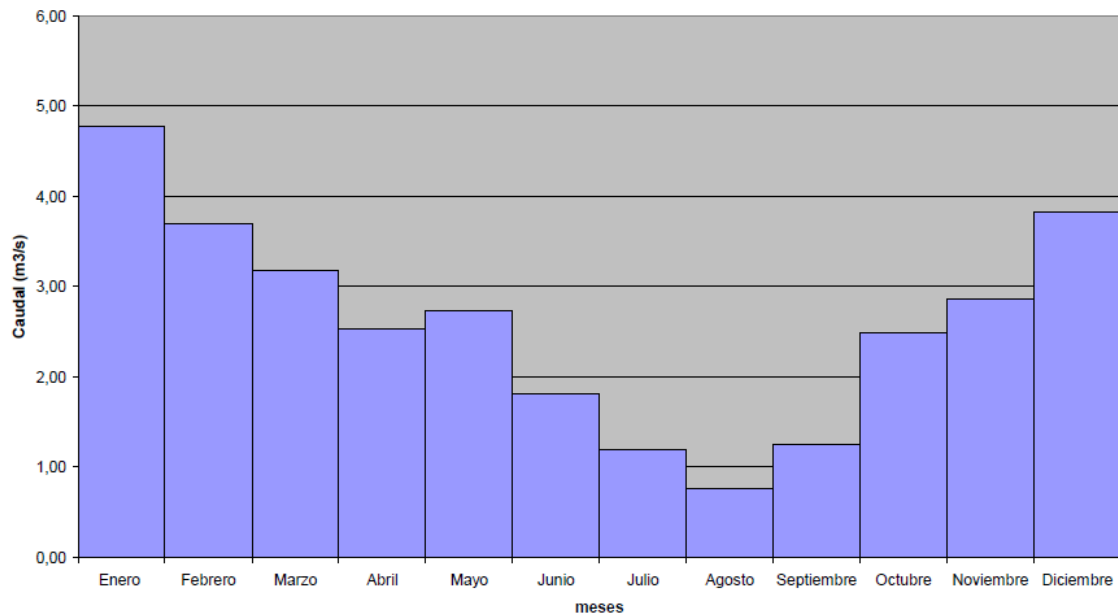


Fig. 10. Hidrograma Rio tipo mensual.
Fuente: Elaboración Propia

HIDROGRAMA POR DIA

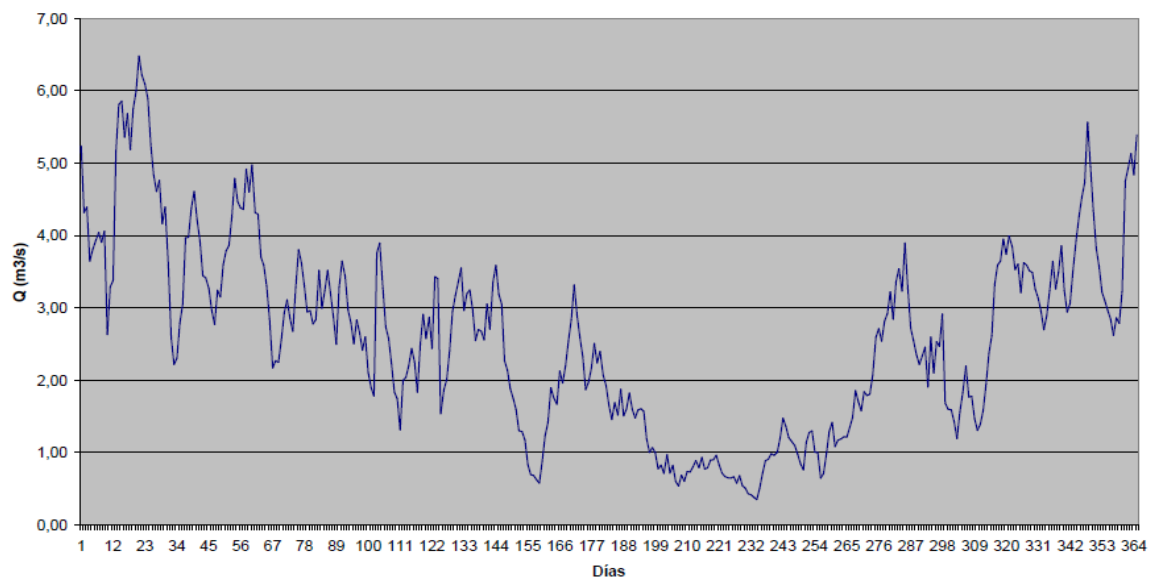


Fig. 11. Hidrograma Rio tipo mensual.
Fuente: Elaboración Propia

Salto

En este caso y al ser considerado constante, solamente se va a hacer una pequeña introducción sobre el salto de la instalación. El salto debe ser el máximo permitido por el terreno, teniendo en cuenta el impacto ambiental que puede causar y su viabilidad económica. Generalmente existen tres tipos de salto:

- Salto bruto (Hb)

- Salto útil (H_u)
- Salto neto (H_n)

El primero se define como la diferencia de altura existente entre la lámina de agua en la toma y el nivel normal de río en el punto en el que se descarga el caudal turbinado. El salto útil es el desnivel entre la superficie del agua en la cámara de carga y el desnivel de desagüe en la turbina, y el salto neto se tiende como la máxima energía que se puede transformar en trabajo en el eje de la turbina y es igual al salto bruto menos las pérdidas de carga. Las pérdidas de carga están causadas por la fricción del agua en el canal, con una mayor importancia en la tubería forzada. Estas pérdidas se miden por caídas de presión y se pueden considerar entre un 5% y un 10% del salto bruto.

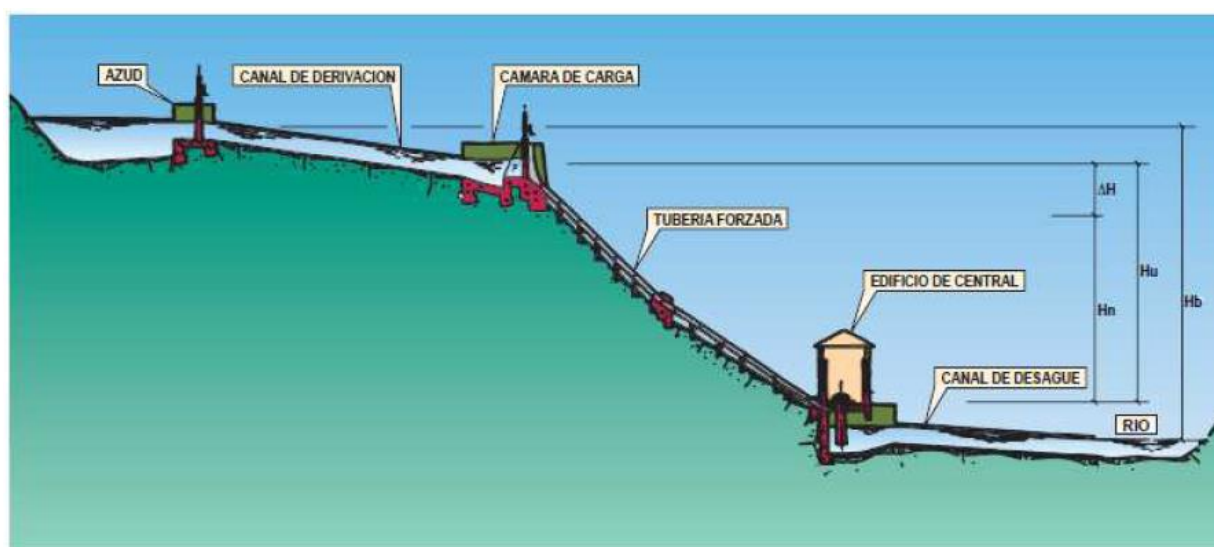


Fig. 12. Curva de caudales
Fuente: Elaboración Propia

En este proyecto todos los cálculos están realizados con el salto neto, y en caso de necesitar el salto bruto, se podría obtener dividiendo el salto neto por un factor comprendido entre 0,9 y 0,95, ya que en el estudio de viabilidad no está definida al detalle la obra hidráulica. De tal manera que en este caso se considera un salto bruto de 12,97m. Para la medición de la altura del salto existen varios métodos como puede ser el método de la escala y del nivel. Sin embargo, el de mayor exactitud es el método de levantamientos topográficos. En este caso el salto neto, incluyendo pérdidas de presión, es de 12m.

VI. DISEÑO

Existen diferentes configuraciones, dependiendo del clima, la situación geográfica etc. En este caso se ha considerado una instalación capaz de generar una base de electricidad mediante una miniturbina y utilizar la energía almacenada en baterías y que fue generada, mediante energía solar fotovoltaica para cubrir o reducir los picos de demanda o cuando por motivos ambientales, como podría ser los años de mayor sequía o paradas de

mantenimiento, no se pueda cubrir el total de la demanda. Las baterías son muy importantes debido a que el sistema está aislado de la red, y por lo mismo es esencial que se pueda asegurar la continuidad energética. También se han de utilizar controladores de carga, inversores y rectificadores, según el siguiente esquema:

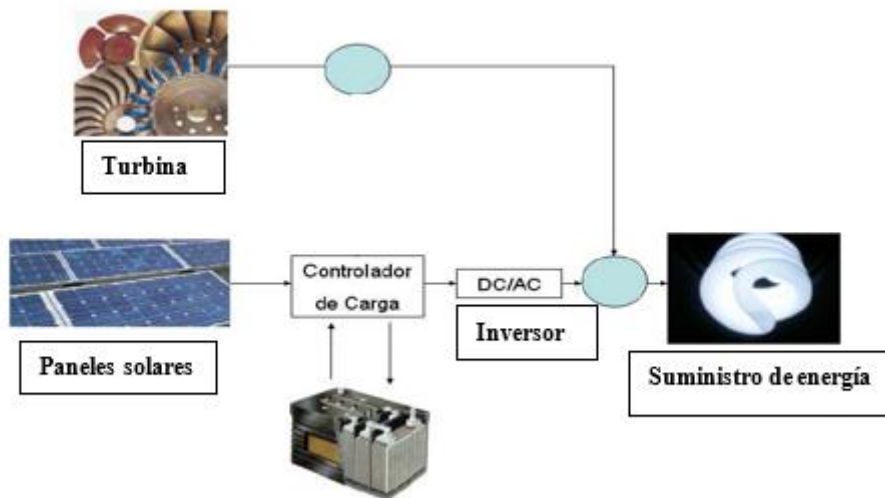


Fig. 13. Esquema básico de la instalación.
Fuente: [5]

Para llevar esto a cabo se seguirá la siguiente estrategia de operación:

- La energía eléctrica generada por la mini turbina tendrá prioridad de consumo respecto a la almacenada en el conjunto de baterías y la generada por los paneles fotovoltaicos.
- La energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos se utilizará principalmente para cargar el conjunto de baterías. En caso de que esté cargadas o descargadas, se utilizará para el consumo de la población, únicamente mientras no se genere suficiente con la mini turbina.
- Si el total de la energía eléctrica generada es mayor que la energía eléctrica consumida se dispondrá a cargar las baterías. En caso de llenar la batería, la energía eléctrica sobrante será disipada o se desconectarán los generadores de las baterías.
- Si el total de la energía eléctrica demanda es superior al de energía eléctrica generada mediante energía hidráulica, se utilizará la energía almacenada en las baterías, o en su defecto la generada por los paneles fotovoltaicos.
- En caso que no se pueda satisfacer la demanda se cortará el suministro a algunos consumidores dejando los de prioridad, como pueden ser las neveras y algunas luminarias.
- En caso que no se pueda alimentar a los consumidores de prioridad, se ha de cortar el suministro total y se esperara a que algunas de las tecnologías utilizadas puedan generar suficiente electricidad.

VII COMPROBACIONES DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se pretende comprobar, si se cubre la demanda durante todo el año además de verificar los resultados obtenidos. Para ello podemos observar la siguiente tabla, en esta se esboza de manera global cómo se pueden cumplir con las necesidades de la instalación, ya que ningún valor del balance energético es negativo. Vale la pena destacar que la aportación de la energía hidráulica y fotovoltaica es el máximo que pueden generar, así como la demandada también es la máxima:

Mes	Energía Hidráulica útil (kWh)	Demanda Población corregida (kWh)	Generación Fotovoltaica útil (kWh)	Aportación batería neta (kWh)	Balance energético (kWh)
Enero	242.800	53.193	6.916	0	196.523
Febrero	183.589	46.670	7.605	0	144.524
Marzo	173.134	47.749	9.867	0	135.252
Abril	130.358	41.419	10.333	0	99.272
Mayo	145.325	38.196	12.210	0	119.339
Junio	88.803	33.749	12.306	0	67.359
Julio	52.276	33.451	15.636	0	34.461
Agosto	23.406	34.191	14.704	1.404	5.323
Septiembre	53.395	35.784	12.478	0	30.089
Octubre	132.895	41.370	10.458	0	101.983
Noviembre	147.733	45.068	9.685	0	112.350
Diciembre	207.217	51.442	8.619	0	164.393
TOTAL	1.580.930	502.283	130.817	1.404	1.210.868
MEDIA MENSUAL	131.744,1	41.856,9	10.901,4	117	100.906

Tabla 3. Balance energético
Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente se puede observar el grafico del balance energético, donde siempre se ha generado más energía máxima útil que consumida por la población a lo que llamamos balance energético neto mensual.

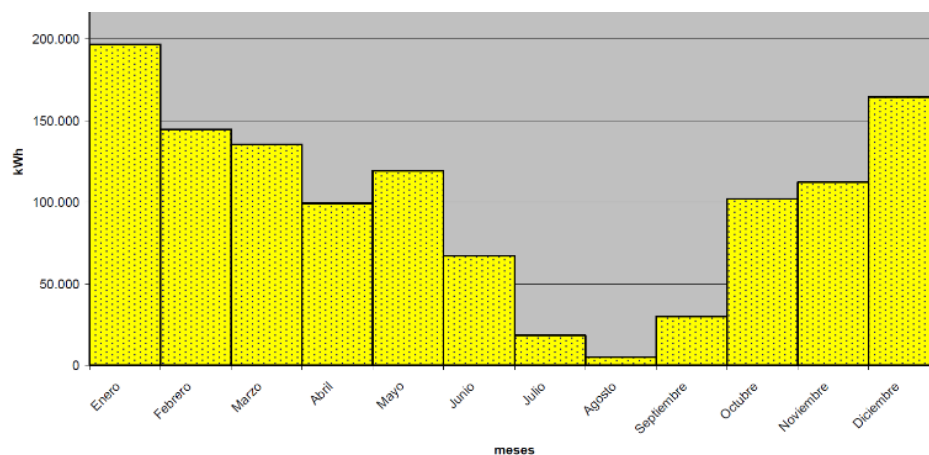


Fig. 14. Balance energético neto anual por meses
Fuente: Elaboración Propia.

Si se observa bien en esta instalación día a día se puede ver que la aportación de la batería esta únicamente en el mes agosto, siempre y cuando no haya ningún imprevisto o tareas de mantenimiento. La siguiente tabla nos muestra el número de días en que se ha aportado energía de las baterías

Mes	Aportación batería neta (kWh)	Días uso batería
Enero	0	0
Febrero	0	0
Marzo	0	0
Abril	0	0
Mayo	0	0
Junio	0	0
Julio	0	0
Agosto	1.404	8
Septiembre	0	0
Octubre	0	0
Noviembre	0	0
Diciembre	0	0
TOTAL	1.404	8
MEDIA MENSUAL	117	1

Tabla 4. Número de días en que se ha aportado energía de las baterías
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede evidenciar en esta tabla es en el mes de agosto, que incluye el peor día, cuando se hace el uso de batería, y además se necesita usar directamente la energía generada en los paneles fotovoltaicos para satisfacer la demanda. Así puede observarse a continuación:

Día	Caudal (m3/s)	Energía hidráulica (kWh)	Demanda (kWh)	Generación solar (kWh)	Balance Energético (kWh)	Estado de la batería neta (kWh)	Aportación de la batería (kwh)	Estado de la batería neta (%)
230	0,51	503,04	1104,06	474,02	-127,01	1658,97	127,01	88%
231	0,43	427,43	1106,17	472,10	-206,64	1452,33	206,64	77%
232	0,42	412,82	1108,35	470,18	-225,34	1226,98	225,34	65%
233	0,38	376,88	1110,60	468,27	-265,45	961,53	265,45	51%
234	0,35	347,33	1112,93	466,35	-299,25	662,28	299,25	35%
235	0,51	504,46	1115,32	464,43	-146,42	515,86	146,42	28%
236	0,71	705,81	1117,78	462,52	50,55	566,40	0,00	30%

Tabla 5. Energía generada en los paneles fotovoltaicos para satisfacer la demanda
Fuente: Elaboración Propia.

Como puede apreciarse, se ha considerado tanto el consumo como la generación neta final y los valores medios por día. Se puede apreciar que en el peor día para el tanque de baterías (235) es justo el día siguiente al peor día para la relación generación-consumo. Esto es debido a que la batería se ha estado descargando durante este periodo hasta alcanzar su más bajo rendimiento (234). Pasado este día la aportación del tanque de baterías se ve reducida notablemente pudiendo recuperar el estado máximo poco a poco. Por otro lado, también se puede ver, en los siguientes gráficos el balance energético con la aportación del tanque de baterías para el peor mes el cual sería agosto:

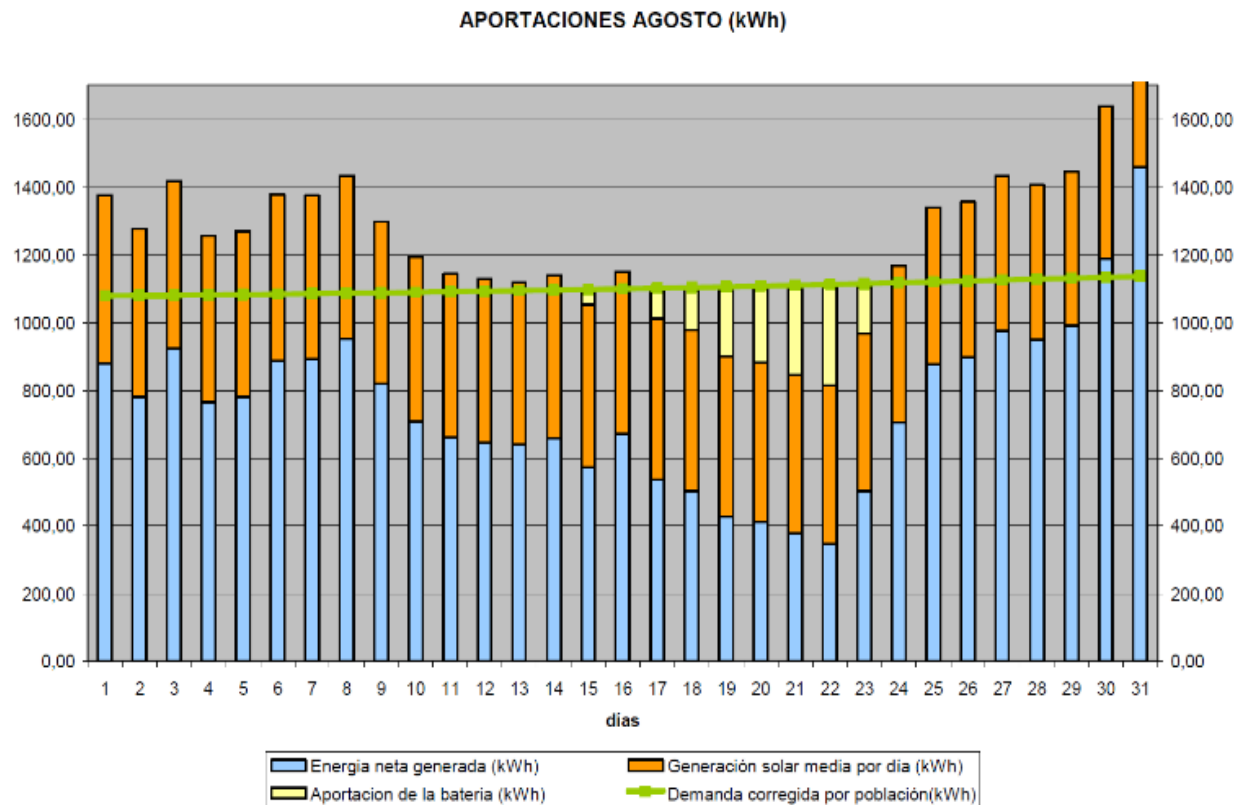


Fig. 15. Balance energético neto durante el mes de agosto
Fuente: Elaboración Propia.

Se puede evidenciar que toda la demanda está cubierta gracias al aporte efectivo de energía. No obstante, en el mes de agosto, el caudal turbinable es muy pequeño y no se puede satisfacer la demanda únicamente con energía hidráulica y fotovoltaica, como pasa en otros meses, como son junio, julio y septiembre. La diferencia es que en el mes de agosto se necesita también el uso del tanque de baterías para poder satisfacer la demanda. En este sentido, para este mes la aportación de la energía solar es muy importante, así como la de las baterías. Se podría representar también la aportación de cada tecnología en porcentaje por meses y su peso total a lo largo de un año, incluyendo la carga de las baterías mediante energía solar. Los resultados de estas aportaciones están la siguiente tabla:

Mes	Aportación hidráulica (kWh)	Aportación fotovoltaica (kWh)	Aportación batería (kWh)	B.E. aportaciones con carga de batería (kWh)
Enero	53.192,57	2.350,00	0,00	2.350,00
Febrero	46.669,93	470,00	0,00	470,00
Marzo	47.749,15	470,00	0,00	470,00
Abril	41.419,14	470,00	0,00	470,00
Mayo	38.196,11	470,00	0,00	470,00
Junio	33.399,53	819,95	0,00	470,00
Julio	32.444,30	1.476,26	0,00	470,00
Agosto	23.405,78	9.758,70	1.404,46	377,68
Septiembre	35.283,49	1.904,88	0,00	1.404,46
Octubre	41.370,47	470,00	0,00	470,00
Noviembre	45.067,86	470,00	0,00	470,00
Diciembre	51.442,21	470,00	0,00	470,00
TOTAL	489.640,54	19.599,80	1.404,46	8.362,14
MEDIA MENSUAL	40.803,38	1.633,32	117,04	696,84

Tabla 6. Aportación de cada tecnología en porcentaje por meses y su peso total a lo largo de un año
Fuente: Elaboración Propia.

Es importante aclarar a partir de la visualización de la tabla anterior que los paneles fotovoltaicos cargan el sistema de baterías incluyendo las pérdidas por almacenamiento mensuales que se han considerado igual a un 3% del total, siendo este valor igual a 470kWh. Esto no significa que la energía hidráulica no se utilice para cargar las baterías,

pero como no es su principal objetivo, en este balance no se ha considerado. A partir de aquí se podrían saber las horas necesarias de funcionamiento para generar esta energía. Siendo estas las siguientes:

1-Instalación hidráulica: 2713,12 horas; 2-Instalación fotovoltaica: 656,24 horas

Se debe aclarar que se ha considerado 8760 hora para generar el máximo de energía hidráulica, mientras que en el caso de la energía fotovoltaica se han considerado la mitad, ya que la media de horas con sol para esa localización es igual a 12,14horas. Porcentualmente estas aportaciones se muestran en la siguiente gráfica.

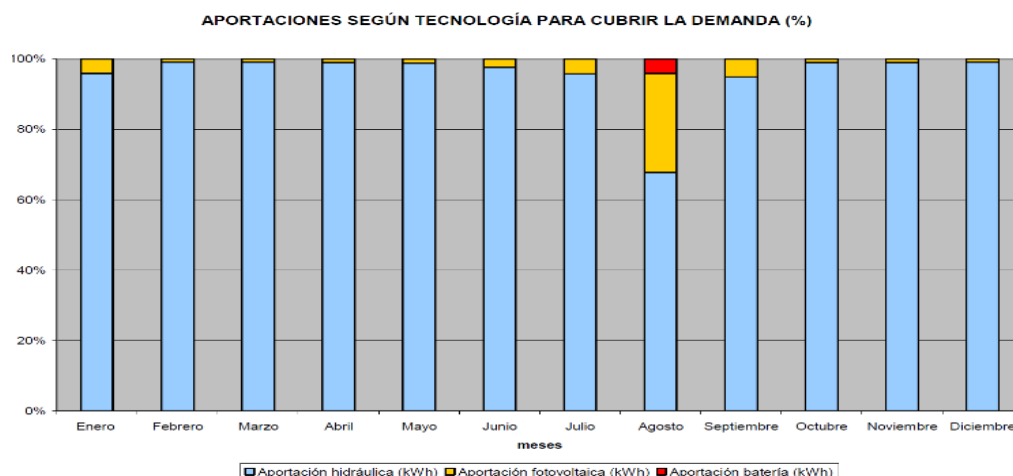


Fig. 16. Aportaciones por tecnología y mes.
Fuente: Elaboración Propia.

De un modo resumido y como se ha podido ver en la gráfica anterior, la aportación eléctrica es mayoritariamente hidráulica con la cual se consigue cubrir el total de la demanda durante aproximadamente nueve meses. Mientras que con la tecnología fotovoltaica se cubren los picos de consumo durante los meses de julio, agosto y septiembre, además, se mantiene y recarga el sistema de baterías. Estas tienen el objetivo, de dar soporte en caso de ser necesario para cubrir de forma efectiva la demanda y dicho soporte está centrado en ocho días del mes de agosto para de este modo cubrir la demanda. En este sentido, vemos las aportaciones anuales y como se cubriría la demanda:

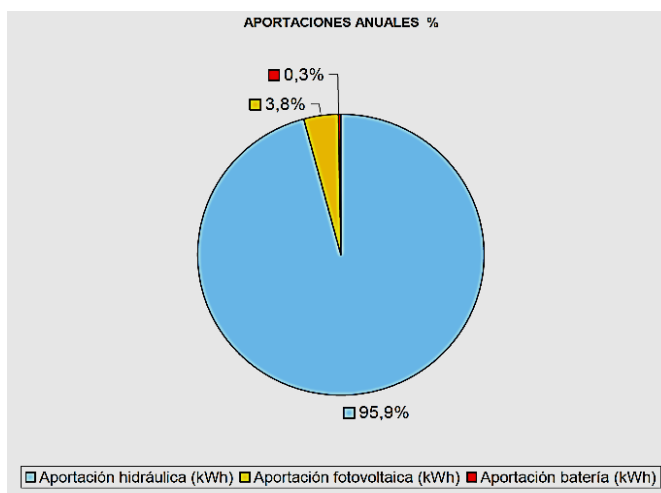


Fig. 17. Aportaciones anuales por tecnología.
Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede ver se cubre la demanda eléctrica escalable de esta población cumpliendo con el objetivo del proyecto.



Como dato importante se hace pertinente comentar que, en el Excel de cálculos adjuntos, se ha añadido una pestaña llamada características desde la cual introduciendo únicamente los siguientes criterios: Salto neto, rendimiento

hidráulico sin turbina, número de viviendas y el área de la fotovoltaica, se obtendría si la instalación es viable. Solo se debe aumentar algún parámetro -debido a que la batería está por debajo del 20%- o es inviable. Todo esto para el río tipo, la demanda tipo, la turbina Kaplan utilizada, el tipo de módulo fotovoltaico y la localización geográfica. Básicamente esto serviría para cuando la población creciera poder hacer un redimensionado rápido y conocer de qué forma se deben ir ampliando los paneles fotovoltaicos.

VII. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para la realización del Análisis económico, se ha considerado que las fuentes renovables de energía, a diferencia de los hidrocarburos y la energía nuclear, coexisten, se complementan y aportan su potencial energético sin contaminar el medio ambiente, para demostrar la posibilidad de utilizar el río y el sol como recursos naturales explotables para obtener energía en esta localidad donde la conexión al sistema nacional interconectado resulta muy difícil y de alta inversión.

Estos resultados conducen a considerar la instalación de paneles fotovoltaicos de la más avanzada tecnología y ampliamente comercializados a escala mundial para diferentes usos, así como también se prevé la construcción de manera artesanal de hidro generadores. Su operación, casi exenta de costos de mantenimiento, garantizará el suministro eléctrico en Teran Pto Salgar, donde el potencial hídrico y solar es satisfactorio.

COSTOS DEL SISTEMA HÍBRIDO

INVERSIÓN

Los sistemas híbridos requieren de una importante inversión de capital inicial que será detallado a continuación. Como contrapartida presentan la ventaja de tener unos gastos de mantenimiento bajos.

- Costos de los componentes de la microrred
- Costos de operación y mantenimiento.
- Tasa para el capital de inversión: la tasa pasiva de 5,1%.
- Costo de la Energía preestablecida por CODENSA-ENEL

Para el presente análisis es importante considerara las condiciones locales, particulares de cada selección como, por ejemplo, la normativa, la radiación solar, velocidad del río, el espacio disponible, etc.

Vida Útil y Amortización de la Inversión

Para estimar la vida útil de un generador fotovoltaico es necesario utilizar referencias internacionales que establecen un valor de aproximadamente 25 años; el equipamiento hidroeléctrico de esta potencia es de aproximadamente 20 años, también se tiene el sistema de acumulación de baterías en el que su vida útil es menor a las anteriores que es de 5 años.

En algunos casos, la inversión inicial se amortiza sólo por la consideración de los costos evitados, es decir por el hecho de que el costo para electrificar la zona mediante conexión al sistema nacional interconectado, es superior al de la instalación de un sistema híbrido. Por ello, la rentabilidad de la instalación de un sistema híbrido.

COSTOS DE LOS COMPONENTES

En el cuadro 14 se puede observar la descripción detallada de los componentes del sistema híbrido y sus respectivos costos obtenidos por referencias de costos similares o por información técnico-económica internacional.

1.-CONSTRUCCIÓN DE OBRAS CIVILES

TIPO DE OBRA	CANT	V/UNITARIO US\$	VALOR TOTAL US\$
CONSTRUCCIÓN CENTRO DE POTENCIA	1	4.500,00	4.500,00
CONSTRUCCIÓN SISTEMA DE ANCLAJE Y FLOTACIÓN DE TURBINA MICRO-HODROELÉCTRICA	2	400,00	800,00
CONSTRUCCIÓN RED DE DISTRIBUCIÓN	1	1.500,00	1.500,00
TRANSPORTE COMPLETO DE COMPONENTES VIA RUTA DEL SOL- SALGRA-TERAN	1	800,00	800,00
TOTAL		7.200,00	7.600,00

2.-COMPONENTES ELECTRICOS Y MECÁNICOS PARA LA MICRORED

CENTRO DE POTENCIA			
PANELES FOTOVOLTAICOS 100W 12 VDC	30	330,00	9.900,00
ESTRUCTURAS PORTA PANELES DE PERFIL DE HIERRO GALVANIZADO PARA 30 PANELES	1	1.200,00	1.200,00
BATERIAS PARA ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA 12 VDC 160 Ah 20 Hrs	20	120,00	2.400,00
REGULADORES O CONTROLADORES DE CARGA 30 A 12 VDC	6	130,00	780,00
INVERSORES DC/AC 700W	9	450,00	4.050,00
CARGADOR/RECTIFICADOR PARA UNIR EL GENERADOR HIDROELÉCTRICO CON EL REGULADOR FOTOVOLTAICA	1	1.500,00	1.500,00
TABLERO DE CONTROL MERLING GERING PARA EQUIPOS DE REGULACIÓN Y ONDULACIÓN	1	500,00	500,00
MISCELÁNEOS (grapas, tape, fusibles, clavos, cable de conexión, terminales de cable y todo aquello que los equipos requieran para su instalación según las especificaciones técnicas de los mismos)	1	2.000,00	2.000,00
TOTAL		6.230,00	22.330,00
MICRO TURBINA HIDROELÉCTRICA			
CONSTRUCCIÓN DE PARTES DE TURBINA PELTON Y DEL GENERADOR	16	500,00	8000,00
TOTAL		500,00	8000,00
RED INTERNA			
RESIDENCIAL	34	250,00	8500,00
COMUNAL Y TURÍSTICA	1	600,00	600,00
TOTAL		850,00	9100,00
TOTAL INVERSIÓN			US\$ 47030,00

Tabla. 7. Costos de los componentes
Fuente: Elaboración Propia.

Para efectos de análisis de la viabilidad del proyecto, no se considerará la inversión de la red interna que puede ser financiado como aporte de la comunidad.

El Valor Total de la inversión es de US\$ 47.030.00

COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de operación y mantenimiento para los sistemas fotovoltaicos son extremadamente bajos por lo que se considera que representan apenas el 1% de la inversión. Igual consideración se debe realizar con el sistema micro hidroeléctrico.

INGRESOS DE OPERACIÓN

Los ingresos de operación han sido estimados manteniendo la política de precios de la regulación del CODENSA –ENEL de precios por KWh. En generación de energía con recursos renovables.

El detalle de los precios unitarios para cálculo del ingreso es el siguiente:

- La Energía generada por fuentes fotovoltaicas: 0,524 USD/KWh.
- La Energía generada por fuentes hídricas: 0,058 USD/KWh.

Los valores correspondientes a la Energía Despachada se calculan independientemente para cada año, tomando en cuenta la repotenciación cada 5 años debido al incremento de carga en la comunidad.

CÁLCULO DE VALOR PRESENTE NETO Y TASA INTERNA DE RETORNO

Con los datos y consideraciones anteriores se corrió el programa de excel l con el fin calcular el Valor Presente Neto (VPN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) del Anteproyecto.

Los resultados fueron los siguientes:

Tasa Pasiva	5.1%
Valor Presente Neto (VPN)	\$ 39079.84
Tasa Interna de Retorno	5.2%

EVALUACION ECONOMICA Y FINANCIERA PROYECTO DE PTO SALGAR.

ITEM	CONCEPTO	TOTAL	OPERACIÓN COMERCIAL									
			AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
1.0	OBRAS CIVILES	7600,0										
1.1	EQUIPO FOTOVOLTAICO	22330,0										
1.2	EQUIPO HIDROELECTRICO	8000,0										
1.3	MONTAJE DEL EQUIPO	500,0										
1.4	LINEA DE TRANSMISIÓN	1500,0										
	TOTAL OBRA FÍSICA	39930,0										

2.0	DEPRECIACIÓN DEL EQUIPO	25564,1	1876,5	2416,5	2416,5	2416,5	2416,5	2804,3	2804,3	2804,3	2804,3	2804,3
2.0.1	FOTOVOLTAICO	12160,0	996,5	996,5	996,5	996,5	996,5	1435,5	1435,5	1435,5	1435,5	1435,5
2.0.2	HIDROELECTRICO	4750,0	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0	550,0	550,0	550,0	550,0	550,0
2.0.3	BATERÍAS	8654,1	480,0	1020,0	1020,0	1020,0	1020,0	818,8	818,8	818,8	818,8	818,8
2.1	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	4546,7	399,3	399,3	399,3	399,3	399,3	510,0	510,0	510,0	510,0	510,0
	TOTAL GASTOS OPERATIVOS	30110,8	2275,8	2815,8	2815,8	2815,8	2815,8	3314,4	3314,4	3314,4	3314,4	3314,4

TOTAL, GASTOS	70040,8
----------------------	----------------

3.0	ENERGÍA FOTOVOLTAICA		3656,5	3656,5	3656,5	3656,5	3656,5	4701,2	4701,2	4701,2	4701,2	4701,2
3.1	ENERGÍA HIDROELÉCTRICA		2032,3	2032,3	2032,3	2032,3	2032,3	2794,4	2794,4	2794,4	2794,4	2794,4
3.2	PARTE NO AMORTIZADA DEL EQUIPO AL AÑO 10		1396,5	1396,5	1396,5	1396,5	1396,5	1985,5	1985,5	1985,5	1985,5	1985,5
	TOTAL INGRESOS ENERGÍA	82831,92	7085,3	7085,3	7085,3	7085,3	7085,3	9481,1	9481,1	9481,1	9481,1	9481,1
	FLUJO DE CAJA	52721,1	4809,5	4269,5	4269,5	4269,5	4269,5	6166,7	6166,7	6166,7	6166,7	6166,7
	TASA DE DESCUENTO	5,10%										
	VPN	\$ 39.709,84										

VIII. CONCLUSIONES

Mediante este proyecto nos propusimos diseñar una instalación híbrida hidráulica-fotovoltaica con las siguientes características. En el caso de la instalación hidroeléctrica se ha instalado una potencia instalada igual 360kW, para la que se utiliza una turbina Kaplan acoplada a un alternador síncrono de 324kW a 690V

para generar electricidad. Además, como la turbina aporta energía al tanque de baterías, se precisa de un convertidor de corriente alterna a corriente continua, con una potencia igual a 110kW.

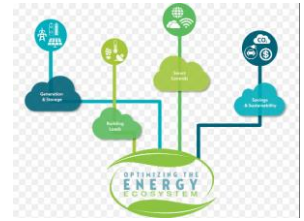
Para realizar el proceso al completo, se requiere agua del río, la cual es adquirida por una toma con rejilla y transportada hasta la turbina por canal de derivación. En el caso de la instalación fotovoltaica, está dividida en dos bloques de paneles fotovoltaicos con una potencia instalada total igual a 106,88kW. El resto de componentes los forman dos tanques de baterías con una capacidad nominal máxima instalada igual a 2250kWh (ambos) y dos controladores de carga en serie asociados a la entrada de la batería más dos inversores con una potencia nominal igual a 70kW cada uno.

De igual forma, tomando como base los resultados de los cálculos, se estima que la puesta en marcha de esta instalación sería posible, y por lo tanto juzgamos viable llevarla a cabo, desde un punto de vista tecnológico, a pesar de la fuerte variación de caudal entre los meses de verano e invierno. Debido al fuerte impacto causado por la falta de caudal en el mes de agosto, la instalación fotovoltaica se ha visto dimensionada para dicho mes, ya que aparte de alimentar a las baterías, se debe generar energía extra para cubrir el mes mencionado.

Existe esta dificultad mencionada en apartado anterior que afecta notablemente la instalación y dispara el área ocupada por el campo fotovoltaico, así como el costo de inversión. Sin embargo, en el caso de que el caudal en verano hubiera sido más elevado, probablemente se podría haber reducido o incluso prescindido del uso de los paneles fotovoltaicos y almacenar energía en las baterías mediante generación hidráulica en periodos de bajo consumo. Con esta instalación se podría cubrir la demanda de la población que aquí ocupa aislada de la red, incluyendo los peores meses y sin el uso de energías no renovables, como podría ser varios motores diésel de emergencia, disminuyendo unas hipotéticas emisiones de CO₂ y la dependencia del petróleo. Esto es de especial interés para la localidad en cuestión debido a que se están promocionando el uso de energías renovables en áreas aisladas de la red por la gobernación de Cundinamarca a un costo manejable.

Se podría tratar en mayor profundidad los costos de las instalaciones y las ayudas del gobierno de Cundinamarca. Teniendo unos precios más exactos se podría llevar a cabo un estudio sobre si es más rentable un cambio en el diseño de la instalación, que sería el uso de la generación fotovoltaica como base para cubrir la demanda y entonces utilizar la energía hidráulica y el tanque de baterías para cubrir picos de la demanda, comprobando también si se obtiene un mejor rendimiento de la instalación.

Igualmente, a partir de estas propuestas sería interesante el estudio del acoplamiento de posibles microneces cercanas con diferentes tecnologías y que serían útiles en países en desarrollo como Colombia. Estas podrían ser la eólica, biomasa, energía solar térmica, geotermia o incluso mini hidráulica, quizás incluyendo un pequeño depósito, situado en río mayor, ya que en esta zona los ríos hacen parte del río principal, río Magdalena lo que favorecería el desempeño de estas fuentes. Esto sería interesante siempre y cuando los aspectos mencionados fueran compatibles y de esta manera se podría aprovechar una microneces de la sobreproducción de las otras, consiguiendo una mayor estabilidad y seguridad en la producción, utilizando únicamente energías renovables en un entorno aislado de las grandes redes eléctricas europeas y/o norteamericanas.



Para finalizar, otra posible mejora sería la simulación del sistema utilizando algún software de diseño y dimensionado de sistemas de energías renovables, como puede ser el Homer [<https://analysis.nrel.gov/homer/>] o el RETScreen [<http://www.etscreen.net/es/home.php>], y de esta manera comprobar varias versiones del sistema y elegir cuál sería la más viable o mejorable de alguna manera.

VI. REFERENCIAS

- [1] Renewable Energy ENEL X Power, Energía convencional.
- [2] **Power System Engineering.** Planning, Design, and Operation of Power Systems and Equipment. J. Schlabbach and K. Rofalski. Ed: Wiley-VCH - 2008 ISBN: 978-3-527-40759-0
- [3] **Assessment of Pico hydro as an option for off-grid electrification in Kenya.** P. Maher, N.P.A. Smith, A.A. Williams. Ed: PERGAMON October 2002
- [4] www.meteonorm.com (s/f), recuperado 4 de marzo 2019 de: <https://meteonorm.com/meteonorm-zeitreihen>
- [5]. **Google imágenes.** <http://www.google.es/imghp?hl=es&tab=wi> Buscado: paneles fotovoltaicos, Batería, Turbina y bombilla.
- [6]. Atmospheric Science Data Center, recuperado 15 de junio del 2019 de: <https://eosweb.larc.nasa.gov/>
- [7]. Mini centrales hidroeléctricas. IDAE y APIA, Ed: IDAE, 2006.
- [8]. **Power System Engineering.** Planning, Design, and Operation of Power Systems and Equipment. J. Schlabbach and K. Rofalski. Ed: Wiley-VCH - 2008 ISBN: 978-3-527-40759-0
- [9] A. I. Cadena. "La política energética colombiana y los retos de coordinación". Revista de Ingeniería Universidad de los Andes n° 25 de 2007. [PDF] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n25/n25a11.pdf>
- [10] Ministerio de minas y energía (Colombia) y UPME. *Plan Energético Nacional* [En línea] Disponible en [Http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx](http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx)