



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

**OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA
HÍBRIDO SOLAR-HIDRÁULICO PARA LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Alumno: Arévalo Cordero, Wilian Paul

Tutor/a: Prof. D. Francisco Jurado Melguizo

Dpto: Departamento de Ingeniería Eléctrica

Julio, 2017

INDICE GENERAL	
RESUMEN	4
ABSTRACT	4
ANTECEDENTES	5
INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVOS	8
METODOLOGÍA	9
1.CAPÍTULO I ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA	10
1.1. Energía Minihidráulica	10
1.2. Tecnología hidrocínética	10
1.2.1. Principio de Funcionamiento	11
1.2.2. Dimensiones de las palas de la turbina	12
1.2.3. Evaluación del Recurso	12
1.2.4. Turbinas	14
1.2.5. Generadores	16
1.2.6. Análisis técnico-económico	19
1.2.7. Optimización	20
1.3. Recurso Solar	23
1.3.1. Distribución de la Energía Solar	23
1.3.2. Tecnología Fotovoltaica	26
1.4. Baterías	30
2.CAPÍTULO II SISTEMAS HÍBRIDOS	36
2.1. Introducción	36
2.2. Arquitectura de un Sistema Híbrido	39
2.3. Métodos de diseño de un Sistema Híbrido	40
2.3.1. Métodos Probabilísticos	41
2.3.2. Métodos Analíticos	42
2.3.3. Métodos Iterativos	43
2.3.4. Métodos Híbridos	46
3.CAPÍTULO III ANÁLISIS DEL ENTORNO	49
3.1.Introducción	49
3.2. Proyectos de electrificación rural aislada	50
3.3. Selección del sitio	54
3.4. Estudio de la demanda	58
3.5. Estudio del Recurso Natural en la zona	59
4.CAPÍTULO IV DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	65
4.1. Introducción	65
4.2. Modelo matemático del sistema	66
4.2.1. Modelo matemático del Grupo Electrógeno	67
4.2.2. Sistema hidrocínético	70
4.2.3. Modelo matemático del Generador Fotovoltaico	74

4.2.4.	Modelo matemático del sistema de almacenamiento	75
4.3.	Simulación del Sistema	76
4.3.1.	Introducción	76
4.3.2.	Algoritmo de búsqueda de patrones (Pattern search algorithm)	77
4.3.3.	Método de Optimización	79
4.3.4.	Análisis del modelo del sistema	84
5.	CAPÍTULO V RESULTADOS Y CONCLUSIÓN	88
6.	CONCLUSIONES	91
7.	REFERENCIAS	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Turbinas de eje horizontal	15
Figura 2:	Turbinas de eje Vertical	16
Figura 3:	Rotores Savonius modificados.	21
Figura 4:	Ilustración de las componentes de Irradiancia que llegan a la superficie terrestre	24
Figura 5:	Espectro solar en el espacio AM0 y en la superficie terrestre AM1,5	25
Figura 6:	Esquema de las actuales tecnologías solares	26
Figura 7:	Funcionamiento de una célula solar	27
Figura 8 :	(a) Célula monocristalina (b) célula policristalina	29
Figura 9:	Batería de plomo ácido	31
Figura 10:	Condiciones ambientales, regulador de carga MPPT y PWM	34
Figura 11:	Variación de la curva P-V de una célula con respecto a la Irradiancia G	35
Figura 12:	Esquema de un sistema híbrido	40
Figura 13:	Diagrama de flujo de la metodología de optimización propuesta	44
Figura 14:	Algoritmo Genético utilizado para el proceso de optimización	45
Figura 15:	Vista del Río Napo desde la comunidad de Cruzchikta	52
Figura 16:	Parroquia Nuevo Rocafuerte, provincia de Orellana	54
Figura 17:	Vista Panorámica de Nuevo Rocafuerte	55
Figura 18:	Ubicación Geográfica de Nuevo Rocafuerte	56
Figura 19:	Curva de demanda diaria Nacional	58
Figura 20:	Gráfico de Irradiación media mensual	60
Figura 21:	Caudales medios en Nuevo Rocafuerte	61
Figura 22:	Cotas diarias en Nuevo Rocafuerte	61
Figura 23:	Calibración en Nuevo Rocafuerte	62
Figura 24:	Curva de duración general en Nuevo Rocafuerte	62
Figura 25:	Medición del ancho de la cuenca del Río Napo	63
Figura 26:	Configuración del sistema Híbrido	66
Figura 27:	Comparación entre una turbina hidrocínética y una turbina eólica	72
Figura 28:	Patrón de búsqueda de puntos de malla	79
Figura 29:	Esquema típico de una microred en HOMER.	82
Figura 30:	Perfil de carga diario en Nuevo Rocafuerte	85
Figura 31:	Perfil de carga estacional en Nuevo Rocafuerte	85
Figura 32:	Velocidad del río	86
Figura 33:	Gráfico de Irradiación media mensual	86
Figura 34:	Sistema híbrido modelado en Simulink	87
Figura 35:	Diseño del sistema en el software HOMER	87
Figura 36:	Resultados de la simulación en el software HOMER	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficiente de mejora de potencia de diferentes etapas de configuración de rotor	22
Tabla 2: Resumen de los resultados de las pruebas de posición óptima del deflector.	22
Tabla 3: Consumo de cargas en corriente alterna	59
Tabla 4: Irradiancia correspondiente a la comunidad de Tiputini en la provincia de Orellana	60
Tabla 5: Medidas de la cuenca del Río Napo en Nuevo Rocafuerte	63
Tabla 6: Cálculo de la velocidad del Río Napo en la estación de Nuevo Rocafuerte	64
Tabla 7: Resultados de la simulación	89

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis de la optimización de un sistema híbrido autónomo compuesto por dos fuentes de energía renovable, paneles fotovoltaicos y turbina hidráulica, como almacenamiento se contará con baterías con la suficiente capacidad para suplir la carga durante el tiempo necesario, también se cuenta con un generador diésel de emergencia en caso que el sistema necesite apoyo dependiendo de las condiciones climáticas adversas que puedan presentarse. El dimensionamiento óptimo del sistema se consigue mediante el software Matlab utilizando su herramienta Simulink Design Optimization y el software HOMER, con el propósito de optimizar el sistema reduciendo la participación anual del generador diésel.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the optimization of an autonomous hybrid system composed by two renewable energy sources, photovoltaic panels and hydraulic turbine, the storage system is composed by batteries with sufficient capacity to supply the load during the necessary time. The system is composed of an emergency diesel generator in case the system needs support depending on the adverse climatic conditions of the place. The optimum sizing of the system is achieved through Matlab software using its Simulink Design Optimization tool and the HOMER software, in order to optimize the system by reducing the annual participation of the diesel generator.

ANTECEDENTES

Actualmente el papel de las energías renovables en el mix energético a nivel global es indispensable, debido a que el consumo de energía es creciente a una tasa cada vez mayor por consecuencia del aumento poblacional e industrial. No obstante, nos encontramos en una situación energéticamente insostenible ya que contamos con recursos limitados para la producción de energía eléctrica a gran escala y las fuentes tradicionales no pueden cumplir estas exigencias sin afectar negativamente, por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero y los costos elevados del ciclo de producción, por esta razón los recursos energéticos renovables son una alternativa adecuada para atender de manera sostenible al creciente consumo de energía especialmente en el sector eléctrico por una transición de una economía basada en combustibles fósiles a una utilización eficiente de la energía.

Recientemente la participación de los sistemas renovables compuestos por más de una fuente de energía es ya una realidad y resulta necesario el desarrollo de proyectos de investigación relacionados con temas afines, en capítulos posteriores se dan a conocer los sistemas existentes en la actualidad, que avances se han presentado y los resultados que se han obtenido.

INTRODUCCIÓN

La utilización de energías renovables como fuente energética también tiene un impacto positivo desde el punto de vista social, actualmente existen una gran cantidad de zonas aisladas de los centros urbanos a donde no llega la red eléctrica, por tanto dichas personas no pueden gozar de los beneficios tecnológicos existentes en la actualidad, en países en vía de desarrollo existe aún una cantidad significativa de personas que no tienen acceso a la electricidad que pueden beneficiarse de los sistemas descentralizados que utilizan energías renovables.

En este caso en particular el uso de la energía solar fotovoltaica y la energía hidráulica fusionados en un solo sistema puede considerarse como fuentes limpias y de recurso adecuado para el lugar de aplicación.

Sin embargo, no es tarea fácil evaluar los sistemas híbridos debido a la aleatoriedad de su recurso primario y su respuesta no lineal complementado con el perfil de carga siempre variable, es por eso que en este trabajo se presenta una evaluación del dimensionamiento del sistema de tal manera que se pueda llegar a optimizar desde el punto de vista ecológico. La integración de los paneles fotovoltaicos junto con la generación hidroeléctrica a pequeña escala ha demostrado ser una opción eficiente para sistemas de energía autónoma, para ello el sistema debe incluir un generador diésel y baterías para el sistema de almacenamiento, de tal forma que sea capaz de hacer frente a cualquier variación inesperada que se presente ya sea por parte del recurso primario o de la carga.

La integración de recursos de energía renovable con recursos fósiles crea los sistemas híbridos de energía (HRESs). Para tener acceso a los costes mínimos tanto de operación como en inversión se debe dimensionar correctamente el sistema que

es donde se centra este estudio, una de las herramientas más potentes para este propósito es el modelo de optimización híbrida para energía renovable (HOMER), software desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL), Estados Unidos. Según estudios, se ha demostrado que un sistema híbrido tiene una mayor confiabilidad que un sistema proveniente de una sola fuente primaria, en este caso la combinación de cuatro fuentes de alimentación asegurará que el sistema pueda abastecer por un tiempo suficientemente necesario para cargas normales y cargas críticas. Por lo que se utilizará el software Matlab para realizar la simulación del sistema para determinar el dimensionamiento óptimo del sistema de la tal manera de minimizar la utilización del generador diésel.

OBJETIVOS

- Optimización de un sistema de generación híbrido autónomo de integración de energías renovables (paneles fotovoltaicos y turbina de río) con un sistema de almacenamiento basados en baterías y un sistema de emergencia basado en un generador diésel minimizando el uso del generador diésel para todo el año.
- Promover el desarrollo tecnológico de las energías renovables en el entorno.
- Reducir emisiones de gases de efecto invernadero producidos por la operación de generadores diesel.

METODOLOGÍA

Se realizará una predicción de la demanda utilizada en el sitio, considerando dispositivos básicos e indispensables de un hogar que se encuentra aislado de la ciudad, ya que se trata de una comunidad aislada en la Amazonía ecuatoriana, se utilizará la curva de carga del consumidor de esa provincia considerando que tienen las mismas costumbres y de menor potencia ya que en la actualidad esas zonas no cuentan con electrificación correcta.

Una vez obtenidos los datos de la curva de carga, se procederá a estimar los recursos del lugar tanto hidroeléctrico como solar, parámetros como Irradiancia y velocidad del agua que se generan en el software HOMER que también pueden ser utilizados para la simulación.

Se realizará el dimensionamiento del sistema mediante modelos matemáticos para cada componente, con la finalidad de simular el comportamiento del mismo en la herramienta Simulink Design Optimization (SDO) en Matlab y en el software HOMER, de tal manera que variando ciertos parámetros sea posible evaluar cuál sería solución óptima del sistema que le permita la mayor coincidencia posible entre oferta y demanda, disminuyendo las horas de operación anual del generador diesel.

1. CAPÍTULO I ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

1.1. Energía Minihidráulica

En este caso se pretende realizar la simulación del sistema hidráulico utilizando una turbina de río, una central hidroeléctrica convencional necesita de una toma de derivación de agua para poder enviarla hasta una cámara de carga y posteriormente hasta las turbinas situadas en un edificio construido para tal propósito, a diferencia de una central micro-hidráulica que únicamente podría funcionar con la instalación de su grupo turbina generador dependiendo del lugar y el recurso.

Aparentemente gran parte de la investigación actual se basa en centrales de gran tamaño y con gran potencia lo cual podría ser la causa de la escasa utilización de la tecnología hidrocínética, en este caso en particular al tratarse de una comunidad de pocos habitantes y alejada del centro urbano es óptima la utilización de la tecnología de los ríos micro-hidrocínicos (MHR) para dicha aplicación.

1.2. Tecnología hidrocínética

Este tipo de energía puede captarse de las mareas, las corrientes oceánicas, las olas, el flujo natural de corrientes de río o los gradientes térmicos marinos, aquí únicamente se explicará la aplicación en ríos de flujo libre que resulta ser lo adecuado para electrificación rural. A diferencia de una instalación hidroeléctrica una turbina hidrocínética capta la energía directamente del agua y la transfiere al generador eléctrico al cual va empotrado por lo que resulta una tecnología lo suficientemente adecuada económicamente.

1.2.1. Principio de Funcionamiento

La cantidad de electricidad que se puede generar a partir de esta fuente de energía depende del volumen y la velocidad del recurso hídrico. Puede instalarse en un caudal con una velocidad del agua que oscila entre 0,5 m / s y superior [3]. Hay muchos conceptos para aprovechar esta energía, pero la turbina ha sido la más común y probada. Al igual que los convertidores de energía eólica, la potencia total disponible (Watt) capturada por la turbina hidrocínética depende de la densidad, el área de la sección transversal, la velocidad en cubos y el coeficiente de la turbina como se muestra en la Ec. (1). La ventaja es que el agua es aproximadamente 800 veces más denso que el aire [5]. Esto simplemente implica que la cantidad de energía generada por una turbina hidrocínética es mucho mayor que la producida por una turbina eólica de igual diámetro a igual velocidad del viento y el agua.

$$P = \frac{1}{2} * A * \rho * V^3 * C_p \quad (1)$$

Donde A es el área de la turbina en metros cuadrados, ρ es la densidad del agua (1000kg/m³), V es la velocidad de la corriente de agua (m/s) y C_p es coeficiente de funcionamiento máximo de la turbina o eficiencia que es $16/27 = 0,592$ (potencia máxima teórica disponible).

De forma similar a la turbina eólica, el coeficiente de potencia (C_p) indica que las turbinas hidrocínéticas sólo pueden aprovechar una fracción de la potencia cinética total debido a las pérdidas implicadas. Este coeficiente está limitado a $16/27 = 0.59$ por la bien conocida ley de Betz [8]; [9]. Pero una turbina de río a pequeña escala tiene sus propias pérdidas, lo que reducirá el coeficiente de potencia a alrededor de 0,25. El límite superior es para máquinas altamente eficientes con bajas pérdidas mecánicas.

1.2.2. Dimensiones de las palas de la turbina

Las turbinas hidrocínéticas son turbinas de cabeza cero. Generan electricidad usando energía cinética de recursos hídricos naturales haciendo uso de diferentes tipos de rotores. El dimensionado de la turbina comienza por estimar primero la potencia requerida por la instalación [10]. El radio de la pala de la turbina puede entonces calcularse a partir de la Ec. (2). El coeficiente de potencia de la turbina (C_p) es una función no lineal de la relación de velocidad de punta y ángulo de paso. Sin embargo, para una turbina hidrocínética con ángulo de paso fijo, el coeficiente de potencia sólo se determina por la relación de velocidad de punta [4].

$$P = \frac{1}{2} * \pi * r^2 * \rho * V^3 * C_p(\lambda, \beta) * \eta_D \quad (2)$$

η_D Es la eficiencia del tren de transmisión, La relación de velocidad de punta (λ) se expresa como:

$$\lambda = \frac{w * r}{V} \quad (3)$$

Donde w es la velocidad angular de la turbina en (rad / s).

1.2.3. Evaluación del Recurso

El aspecto relevante de la generación de energía eléctrica a partir de la tecnología hidrocínética es que el recurso es altamente predecible, este se genera por la atracción gravitatoria de la luna con respecto a la tierra que se refleja en los océanos terrestres, dicho fenómeno es conocido como marea [11].

Si las corrientes de agua han sido caracterizadas de forma correcta es posible hacer predicciones precisas de la energía eléctrica generada por las turbinas

hidrocinéticas. Para poder clasificar el tipo de turbina más adecuada para la zona se procede a determinar mediante la dirección de las corrientes marinas [12].

A través de las velocidades variables y los niveles de agua que se pueden encontrar en cualquier río cuando se extrae la energía, los datos necesarios para el desarrollo de un sitio de generación de energía hidrocinética se convierten en altamente específicos del sitio [13]. Hasta la fecha, estas evaluaciones de los recursos hidrocinéticos son limitadas, pero siguen aumentando. Además, las bases de datos globales de los ríos no son fácilmente utilizables para el análisis de la energía de los ríos. [2].

Lalander [14] mostró que los modelos que hasta ahora se han utilizado para estimar el recurso en Dal River, Noruega han demostrado tener cierto grado de incertidumbre ya que no tienen en cuenta el hecho de que las velocidades y los niveles de agua se alteran cuando se extrae la energía a un sistema. Para demostrar las variaciones producidas, se simuló la alteración del nivel de agua debida a las turbinas demostrando que es mucho menor que la alteración del nivel de agua causada por el cambio de nivel en el lago aguas abajo. Se usaron los perfiles de velocidad medidos en varios lugares diferentes para estimar cómo se modificó el coeficiente de potencia. Se estudiaron cuatro configuraciones de turbina y se mostró que los cambios en el coeficiente de potencia eran notables sólo para un perfil de cizallamiento vertical con un fuerte gradiente.

Briand y Ng [15] presentaron el enfoque desarrollado por la firma RSW (ingenieros consultores) para diseñar un sitio hidrocinético en el medio ambiente ribereño, desde la evaluación de recursos hasta el diseño detallado de ingeniería. Este enfoque se centra en el desarrollo de sitios hidrocinéticos desde las primeras etapas de identificación de ríos con potencial (evaluación de recursos, clasificación de sitios de

interés más interesante a menos interesante) a estudios hidrológicos, hidráulicos, ambientales y económicos (estudios de prefactibilidad y viabilidad) Y finalmente al diseño detallado de ingeniería de un prototipo y de una eventual granja de turbinas.

Duvoy y Toniolo [16] desarrollaron una nueva herramienta llamada HYDROKAL para la evaluación de recursos hidrocinéticos en ríos. Esta herramienta incluye un factor de eficiencia definido por el usuario para tener en cuenta la eficiencia de la turbina, que es fundamental para estimar la energía que se podría obtener del río. Para cada sección transversal del río, la velocidad máxima se identifica para ayudar a estimar la estabilidad del alcance del río y, por lo tanto, la factibilidad de instalar una turbina.

1.2.4. Turbinas

Se han desarrollado varios conceptos de conversión hidrocinética, pero la turbina es la más utilizada. En el caso de los ríos o vías navegables artificiales, esta tecnología de turbina se conoce generalmente como turbinas de corriente de río (RCT) o sistema de conversión de energía de río (RCECS) [17]; [18]. RCT están generalmente en el rango de 1-10 kW [19]. Los RCT se configuran como turbinas de eje horizontal o vertical similares a las desarrolladas para la generación eólica.

Los dos conceptos de turbina hidrocinética a pequeña escala más comunes son la turbina de flujo axial y la turbina de flujo cruzado [20]. La selección del tipo de turbina depende del tipo de flujo, la velocidad y la salida deseada del sistema [3]. Las turbinas de flujo axial (alternativamente llamadas de eje horizontal) tienen ejes paralelos al flujo de fluido y emplean rotores del tipo de hélice. Varias disposiciones de turbinas de flujo axial se muestran en la Fig. 1. Las turbinas de eje inclinado (i) se han estudiado principalmente para los convertidores de energía de los pequeños ríos. Otras turbinas de flujo axial (ii, iii y iv) se utilizan principalmente para la

extracción de energía oceánica y son similares a las turbinas eólicas en términos de diseño y punto de vista estructural [3]; [17]; [20]; [21].

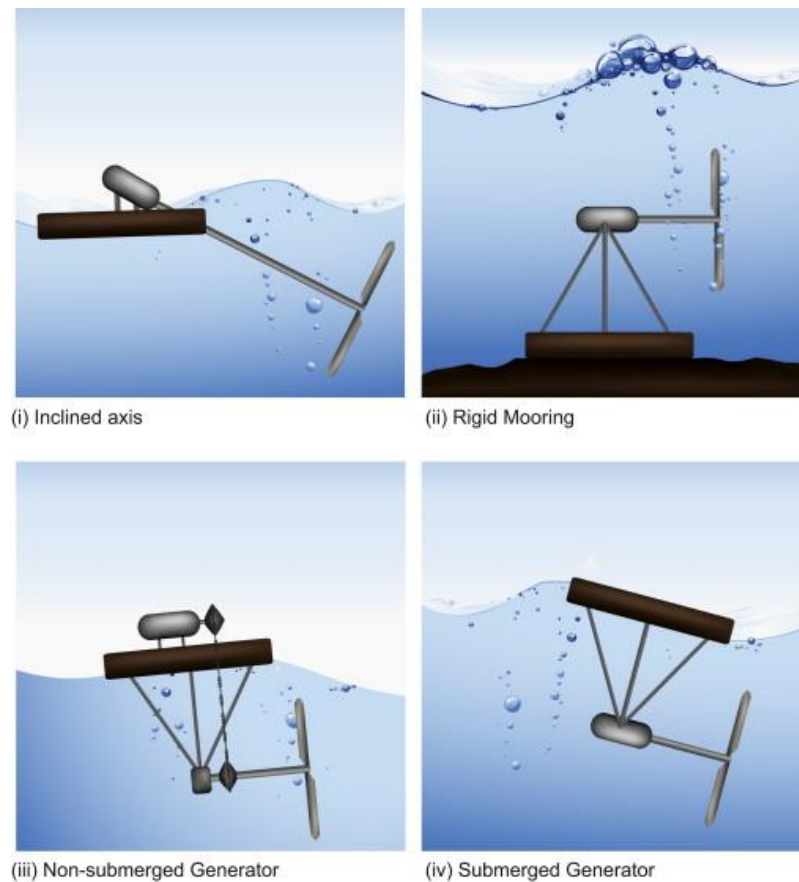


Figura 1: Turbinas de eje horizontal

Fuente: [17] ; [20]

Las turbinas de flujo cruzado (Fig. 2) tienen ejes de rotor ortogonal al flujo de agua pero paralelo a la superficie del agua. Pueden dividirse en eje vertical (eje vertical a plano de agua) y en plano (eje en el plano horizontal de la superficie del agua). Las turbinas en el plano (i) son generalmente dispositivos basados en arrastre y se dice que son menos eficientes que sus contrapartes basadas en elevadores [2].

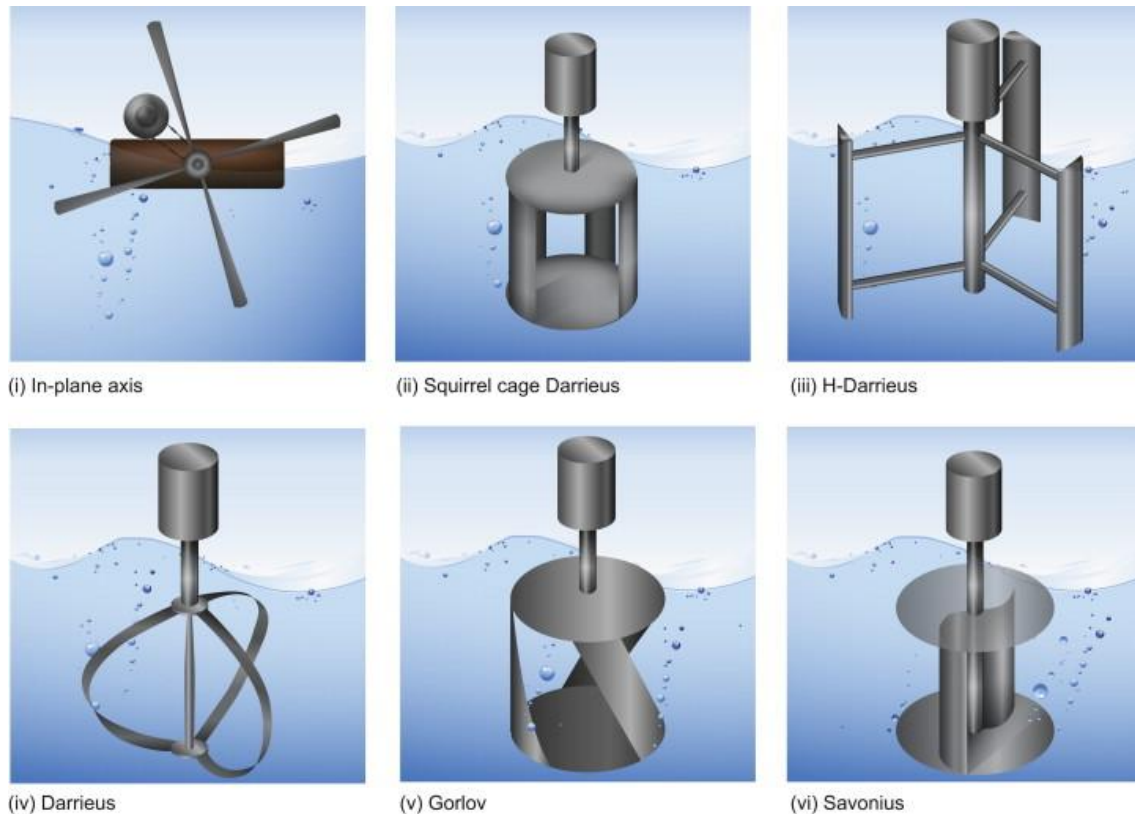


Figura 2: Turbinas de eje Vertical

Fuente: [17] ; [20]

1.2.5. Generadores

Los generadores eléctricos son dispositivos que convierten la energía mecánica en energía eléctrica. Los generadores generalmente pueden dar corriente continua (DC) o corriente alterna (AC). La elección de un generador para una aplicación específica se rige por el número de factores tales como la velocidad del motor primario, la potencia de salida requerida, el rango de operación y uso. Las plantas hidrocinéticas utilizan los mismos generadores utilizados por la generación de energía hidráulica y eólica convencional. Generalmente, los dos generadores de uso común en sistemas de turbinas eólicas e hidrocinéticas son generadores síncronos y de inducción [4].

Generadores síncronos

La principal característica de este tipo de generador eléctrico es que trabaja a una velocidad de rotación de su eje de tal manera que se encuentra sincronizado con la frecuencia de la red (60Hz en el caso de Ecuador). Como alimentación primaria constan mayoritariamente con un sistema de excitación de corriente continua y en casos especiales de un electroimán permanente no es muy común utilizarlo en escalas pequeñas debido a su mayor coste. Por ende el sistema que más se ha utilizado desde hace décadas es el de excitación mediante un sistema de excitación a corriente directa el cual garantiza el correcto funcionamiento del sistema, las ventajas de este sistema son; bajo coste, niveles de ruido aceptables, alta vida útil, entre otros [4].

Tal vez una de las mayores ventajas es que puede funcionar en modo isla, es decir aislado de la red lo cual es ideal para operar en poblaciones rurales alejadas de la red eléctrica.

Para trabajar con velocidad variable, incluye un convertidor de frecuencia, compuesto por un rectificador. El rectificador transforma los rangos de frecuencia de deslizamiento y las corrientes en tensiones y corrientes de corriente continua, y un inversor transforma tensiones y corrientes de corriente continua en tensiones y corrientes de frecuencia síncrona en corriente alterna [22].

Generadores de inducción

Son del tipo de generadores más utilizados en aplicaciones de pequeña escala en cargas aislada de la red. Esto es debido a su robustez y menor ratio potencia tamaño que un generador síncronos [23]. A diferencia de estos, el generador de inducción no requiere una fuente de CC de excitación externa [24].

Los generadores de inducción se clasifican en: generadores doblemente alimentados y de tipo jaula de ardilla que son los de uso común hoy en día ya que no cuentan con escobillas [4]. Aunque su eficiencia es menor a la de un generador síncrono el de tipo inducción es capaz de funcionar a velocidad variable sin necesidad de un convertidor de frecuencia lo cual resulta óptimo para aplicaciones en pequeñas redes aisladas de generación de energía eléctrica.

Los generadores de inducción se basan en una conexión a una fuente externa de potencia, es decir, la red eléctrica, para establecer y controlar el campo magnético giratorio. Sin embargo, cuando se utilizan generadores de inducción en funcionamiento aislado, es decir, para funcionamiento fuera de la red, la excitación se realiza a través de una conexión en paralelo de un banco de condensadores [55].

Thomas, et al. [25] diseñaron un eficiente generador de imanes permanentes a baja velocidad que se utilizará para velocidades de corriente de baja marea, del orden de 1 m / s . Este generador puede ser adecuado para aplicaciones de río de baja velocidad, así como funciona eficientemente a velocidades variables y elimina el uso de la caja de cambios para reducir las pérdidas de transmisión. Tiene una potencia de 5 kW a una velocidad de corriente de agua de $1,5 \text{ m / s}$

Generadores de corriente continua

El generador de corriente continua es una máquina capaz de transformar la energía cinética del agua en energía eléctrica de corriente continua (CC). Los generadores de CC están equipados con un sistema de excitación de corriente continua, son generalmente caros. Hermann [6] demostró que el uso de un generador de corriente continua para cargar baterías a través de pequeñas centrales hidroeléctricas no es una solución viable para la electrificación rural. Su uso está restringido debido a la

baja eficiencia de transmisión. La principal razón de ser debido a la baja tensión generada, la transmisión eléctrica será difícil. Los generadores de CA son los más adecuados para suministrar electricidad a zonas remotas [1].

1.2.6. Análisis técnico-económico

Los procesos de electrificación rural se están llevando a cabo en muchos países en desarrollo y subdesarrollados con la ayuda de países desarrollados o de los gobiernos mediante incentivos o programas de subvenciones [26]. La mayoría de las personas que viven en zonas rurales son muy pobres. Por lo tanto, existe la necesidad de llevar electrificación rural más asequible para aliviar la pobreza. Entre las diferentes tecnologías de energía renovable, el MHR (energía renovable microhidráulica) es fácil de diseñar y puede ser instalado y mantenido fácilmente por la población local a bajo costo si se instala en áreas remotas y rurales. Pocos estudios se han hecho para probar los beneficios técnicos y económicos de esta tecnología.

Kusakana y Vermaak [7]; [27] investigaron la posibilidad de utilizar y desarrollar energía hidrocínética para suministrar electricidad confiable, asequible y sostenible a zonas rurales, remotas y aisladas de Sudáfrica. Las simulaciones se realizaron por medio del software: Hybrid Optimization Model for Electric Renewable (HOMER) utilizando la misma carga para cada opción de suministro. El objetivo era comparar la hidrocínética con las otras opciones de suministro, tales como generadores independientes de PV, viento, generador diésel y línea de extensión de red. Basándose en los costos de coste actual neto (CPN), costo de energía (COE) y breakeven, se demuestra que la energía hidrocínética (HKP) es la mejor opción.

Kunaifi [28] evaluó la opción más rentable aprovechando la energía de una combinación de Darrieus Hydrokinetic Turbine (DHT) y diferentes fuentes de energía. El objetivo era mejorar la sostenibilidad de los programas de electrificación rural en Riau. Se utilizó el programa de simulación HOMER. Este software no está equipado con un módulo de flujo libre de río. Para la simulación de potencia hidrocínética, se utilizó el módulo de turbina eólica, ya que comparte muchas similitudes con el sistema de turbina hidrocínética. A partir de los resultados de la simulación, se encontró que la mejor tecnología híbrida para satisfacer la demanda de carga del 100% fue la combinación de PV, Hydrokinetic, Diésel, Battery e inversor.

1.2.7. Optimización

La mejora de la eficiencia energética del sistema de generación es fundamental con la demanda de energía y los costos aumentando, además puede tener un impacto significativo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Existen varias técnicas / métodos de optimización de la tecnología de MHR basados en el costo y el desempeño.

Optimización de costes

Anyi y Kirke [10] demostraron que la construcción de una turbina hidrocínética óptima es posible mediante el uso de herramientas comunes, materiales comunes y plantillas simples.

El método simplificado de la construcción de las palas permite que se haga en una aldea remota cerca de donde será utilizado y para su posterior mantenimiento. Esto reducirá el costo total de un sistema de turbinas significativamente ya que se puede evitar constes por transporte. Además, la construcción local crea oportunidades de trabajo que podrían ayudar financieramente a las personas del lugar.

Evaluación del desempeño

Golecha et al. [29] llevaron a cabo una investigación experimental sobre la mejora del rendimiento del rotor Savonius modificado proporcionando una placa deflectora en el lado de la hoja de retorno de la turbina. El experimento se llevó a cabo para encontrar la configuración adecuada de las placas deflectoras en el lado de la hoja de retorno y el lado de la hoja que avanza. Los resultados concluyen que la placa deflectora en su posición óptima aumenta el coeficiente de potencia (C_p) en un 50% para un rotor modificado en una etapa.

El rendimiento se deteriora aumentando el número de etapas.

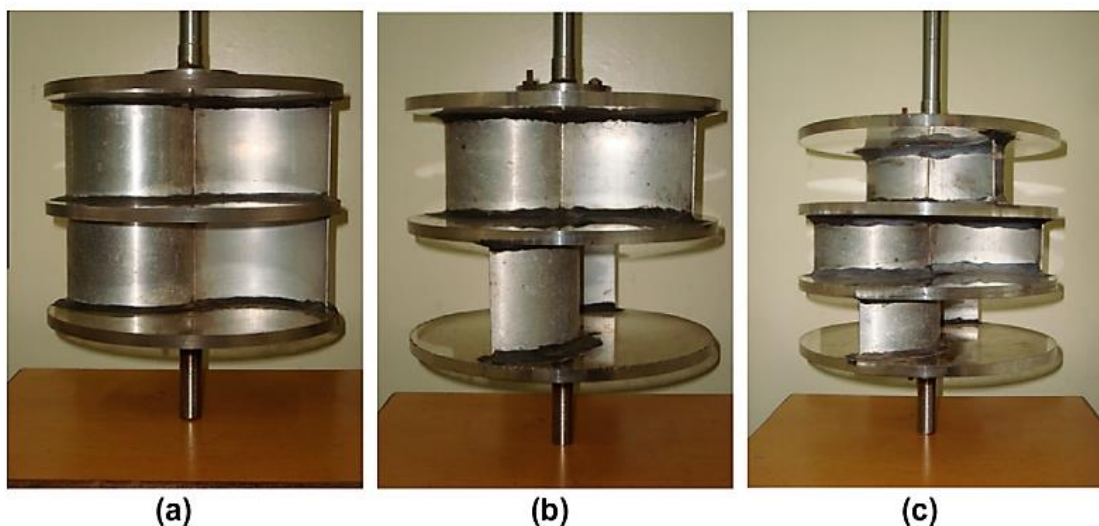


Figura 3: Rotores Savonius modificados. (a) Rotor de dos etapas con cambio de fase 0. (b) Rotor de dos etapas con cambio de fase 90. (c) Rotor de tres etapas.

Fuente: K. Golecha et al. / Applied Energy 88 (2011) 3207–3217

Esto sugiere que el uso de una sola etapa de Savonius modificado rotor es mejor en comparación con dos y tres etapas. El resumen de los resultados de las pruebas de rendimiento de diferentes etapas de configuración del rotor de Savonius se muestra en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1: Coeficiente de mejora de potencia de diferentes etapas de configuración de rotor

Savonius modificadas

Nº de etapas del rotor Savonius modificado	% Cp Mejora
De una sola etapa	50
Dos etapas (cambio de fase de 0 °)	42
Dos etapas (cambio de fase de 90 °)	31
Tres etapas	15

Golecha et al. [30]; [31] estudiaron el rendimiento de la turbina de agua Savonius modificada con dos placas deflectoras. El objetivo de este estudio fue identificar la posición óptima de la placa deflector colocada aguas arriba al flujo que aumentaría la potencia generada por el rotor. Los resultados sugirieron que las dos placas deflectoras colocadas en sus posiciones óptimas aguas arriba del flujo aumentan el coeficiente máximo de potencia (C_{pmax}) a 0,35 frente a 0,21 con una sola placa deflector en el lado de la hoja de retorno y 0,14 sin placa deflector. Esto muestra la característica de usar placas deflectoras tanto en el lado de la hoja que avanza como en el lado de la hoja que retorna para aumentar el rendimiento del rotor Savonius modificado. El resumen de los resultados de las pruebas de posición óptima del deflector se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Resumen de los resultados de las pruebas de posición óptima del deflector.

Nº de placas deflectoras	C_{pmax}	Relación de velocidad de la punta
Placa deflector cero	0,14	0,7
Una sola placa deflector (en el lado de la hoja de retorno)	0,21	0,82
Dos placas deflectoras (cuchilla deflector adicional en el lado de la cuchilla que avanza)	0,32	1,08

1.3. Recurso Solar

El sol al ser una fuente de energía inagotable para el ser humano se convierte en un recurso renovable para su utilización para generar energía eléctrica, además de ser vital para toda la vida en la tierra es el responsable de mantener una temperatura determinada en la tierra capaz de proveer de recursos como viento, lluvia y energía que es utilizada por los seres vivos. En el interior del sol los átomos de hidrógeno se convierten en helio lo cual libera una cierta cantidad de masa en forma de energía desde su núcleo atravesando varias capas hasta llegar a su superficie, la energía liberada al espacio en forma de fotones atraviesa una distancia de aproximadamente 150 millones de kilómetros para después de ocho minutos llegar a la superficie terrestre en forma de luz y calor.

Únicamente llega una pequeña porción de energía a la superficie terrestre unos $(10 * 10^{18} \text{kWh/m}^2)$, relativamente pequeña pero al compararla con niveles de consumo humano equivale a 10.000 veces energético anual en la tierra, esto quiere decir que únicamente el 0,01 de la energía solar que llega a la superficie sería capaz de cubrir todo el consumo energético mundial durante un año.

1.3.1. Distribución de la Energía Solar

La energía solar que llega a la atmosfera terrestre es 1367 W/m^2 valor conocido como constante solar (B_0), dicho valor es medido en el espacio exterior antes de ingresar a la atmósfera, la radiación que llega a la superficie terrestre en un día despejado puede rodear los 1000 W/m^2 ya que al existir una gran cantidad de partículas suspendidas en las capas atmosféricas la luz solar proveniente es dispersada, absorbida, reflejada y reflectada. La componente de radiación global que llega a la superficie terrestre se divide en tres componentes: La directa, la difusa y la

de Albedo, la primera es la cantidad de fotones que proviene directamente desde la fuente (el sol) sin producirse ninguna desviación del ángulo desde la misma, la radiación difusa es la componente que resulta de la afección de los efectos explicados anteriormente (dispersión, reflexión, etc) y la componente de Albedo resulta de la reflexión de nubes, rocas, montañas o superficies circundantes.

La suma de las tres componentes se le conoce como radiación global, es la que se puede aprovechar para generar energía eléctrica.

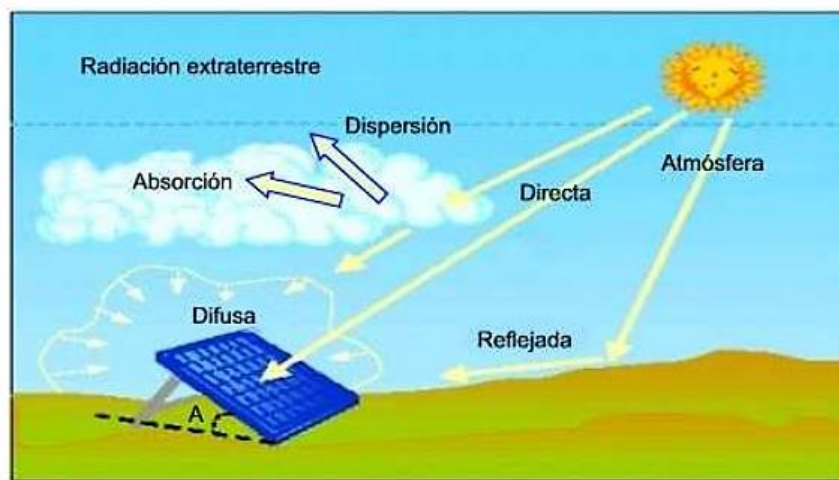


Figura 4: Ilustración de las componentes de Irradiancia que llegan a la superficie terrestre

Fuente: [33]

Las longitudes de onda que son aprovechables en el espectro AM 1,5 oscilan desde 0,3 hasta 3 μ m. En la fig.5 se puede observar la diferencia entre la radiación medida en el espacio AM0 y la medida en la superficie terrestre AM 1,5 este factor de masa representa la altura solar al mediodía y es de 41,8°.

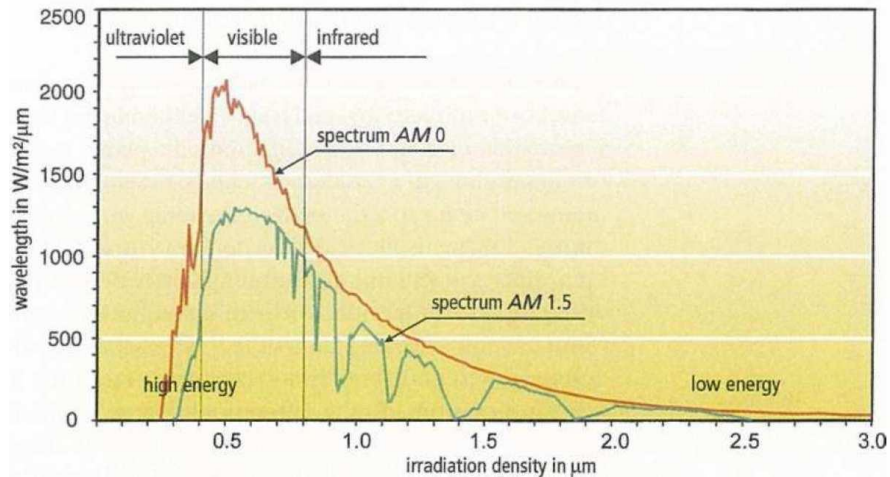


Figura 5: Espectro solar en el espacio AM0 y en la superficie terrestre AM1,5

Fuente: [33]

Cable aclarar la diferencia entre los términos Irradiancia e Irradiación; la primera hace referencia a la cantidad de potencia recibida por metro cuadrado y la segunda se refiere a la cantidad de energía producida por dicha potencia en un metro cuadrado de superficie, lo cual significa que la irradiación se puede calcular como la integral de la Irradiancia en un periodo de tiempo determinado.

La radiación no se distribuye de manera homogénea en toda la superficie terrestre debido a factores como la declinación solar, la latitud del lugar, longitud, día del año inclinación de la superficie, etc. Lo cual resulta necesario para cada lugar donde se pretenda instalar un sistema fotovoltaico hacer un estudio completo para de esa manera evaluar la inclinación óptima de los paneles, así como el tipo de panel, la configuración de módulos, la productividad anual y el performance ratio PR que es un parámetro de evaluación global para un sistema FV.

Para el caso de Ecuador, se tiene una latitud 0 para la capital del país la ciudad de Quito, por ende para el lugar de estudio se tendrán latitudes similares.

1.3.2. Tecnología Fotovoltaica

Con respecto a la producción de energía eléctrica a partir del sol como fuente renovable tenemos dos principales grupos: captación solar térmica y tecnología fotovoltaica, a continuación se puede observar la clasificación existente:

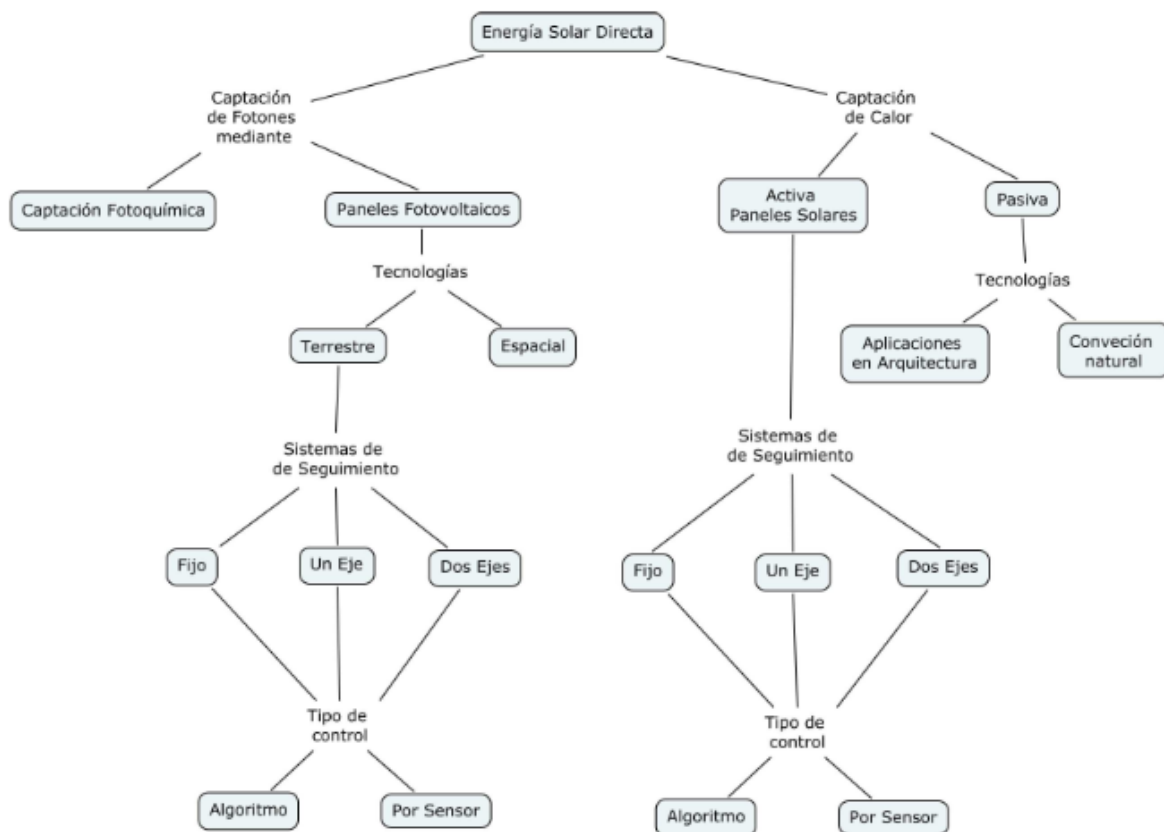


Figura 6: Esquema de las actuales tecnologías solares

Fuente: [34]

La tecnología de captación solar por concentración no se muestra en el esquema al ser una tecnología en desarrollo pero cabe aclarar que últimamente se han producido importantes investigaciones con respecto a la alta eficiencia de las células multiunión.

En este estudio se hará hincapié a la tecnología solar fotovoltaica, repasando algunas tecnologías existentes y algunos conceptos de dimensionamiento de un generador fotovoltaico ya que el alcance de este documento se inclina más a la

optimización del sistema híbrido en conjunto y no al dimensionamiento de cada componente.

El efecto fotovoltaico fue descubierto por Edmond Becquerel en 1839 pero los módulos no fueron creados hasta más de un siglo después en la década de los 70, una vez superada la crisis del petróleo de los años 60 las entidades políticas optaron por invertir en investigación sobre esta tecnología. El efecto fotovoltaico está basado en el efecto fotoeléctrico descrito por Albert Einstein donde la energía principal proveniente del sol llega en forma de fotones a un material semiconductor del cual están construidas las células solares (mayoritariamente de Silicio), desprendiendo los electrones en la capa de valencia del material pasándolos de la banda de valencia a la banda de conducción produciéndose un voltaje que es proporcional al ancho de la banda prohibida del material.

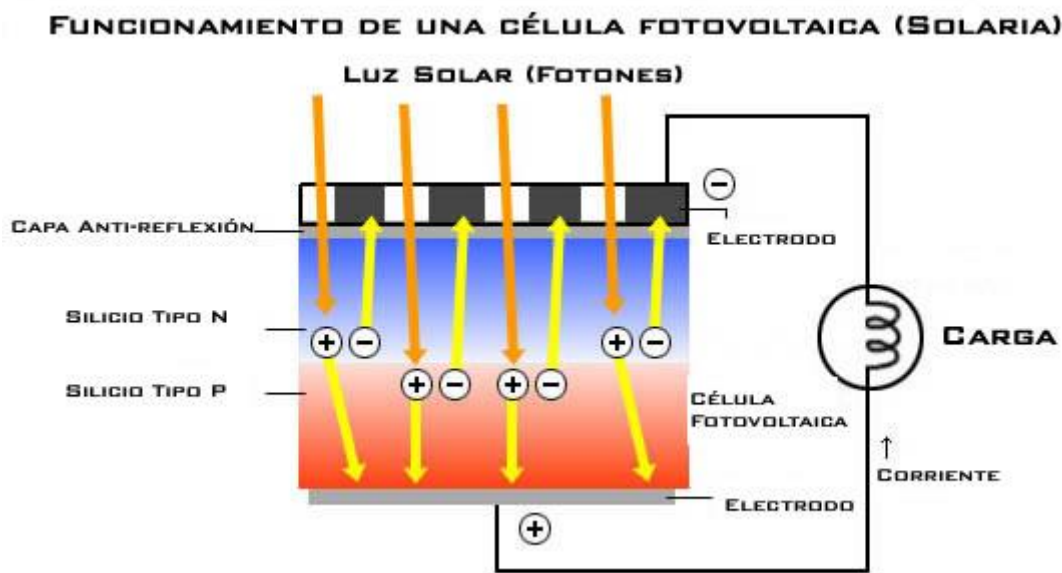


Figura 7: Funcionamiento de una célula solar

Fuente: <http://www.oni.escuelas.edu.ar>

Módulos de Silicio monocristalino y policristalino

Los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino ocupan más de un 80% del mercado mundial de paneles fotovoltaicos, según [35], además es la tecnología más madura en este sector. Las diferencias entre monocristalinas y policristalinas son mínimas, incluso aunque las células monocristalinas son ligeramente más eficaces que las policristalinas, el resultado en cuanto a paneles fotovoltaicos no se diferencia teniendo rendimientos prácticamente iguales, que rondan entre el 10% y el 15%. El rendimiento de estos paneles les da un plus respecto al resto de módulos, debido a que el rendimiento es muy importante en algunas situaciones, donde por ejemplo el área de la instalación está limitada, como puede ser el tejado de una casa o un edificio. Por otro lado, presentan una mayor sensibilidad al efecto de las sombras que otras tecnologías, así como al efecto que causa la temperatura, teniendo mayores coeficientes de temperatura. De tal forma que cuando la temperatura se incrementa, el voltaje y la potencia se ven afectadas negativamente de mayor manera que por ejemplo en el silicio amorfo [34].

Existen paneles fotovoltaicos de silicio cristalino hasta potencia superiores a 300W. Esto tiene ciertas ventajas, como por ejemplo, mayores módulos significan una menor instalación y menos posibilidades de fallo en la interconexión, pero mayores pesos y mayores tamaños, que pueden representar problemas en la fabricación y transporte. Los módulos cristalinos están montados sobre cristal y normalmente tiene marcos rígidos, haciéndolos más pesados y más frágiles que otros tipos de paneles fotovoltaicos [34].

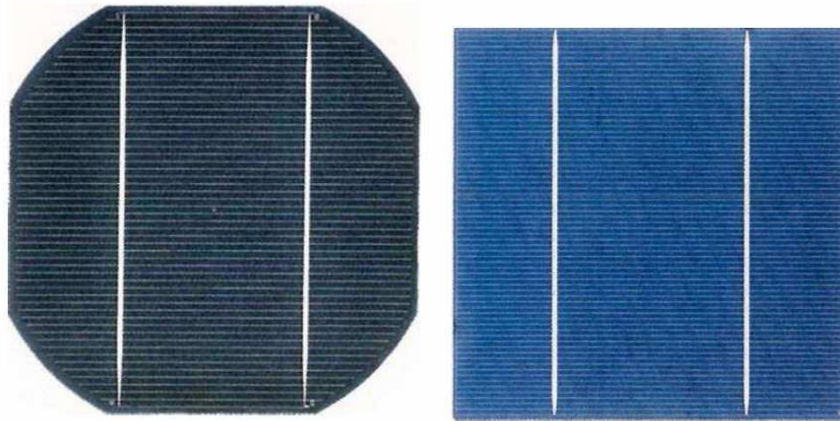


Figura 8 : (a) Célula monocristalina (b) célula policristalina

Fuente: [33]

Módulos de silicio amorfo

Estos módulos son el mayor representante de los paneles fotovoltaicos fabricados con tecnología de capa fina. Desde que los fabricantes empezaron a construir este tipo de paneles fotovoltaicos, los precios han descendido notablemente. En un principio las células que formaban un panel fotovoltaico estaban construidas con una única capa de silicio amorfo; actualmente se han conseguido generar células que con dos o tres capas de silicio amorfo unidas incrementan el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. Sin embargo, sus rendimientos están entre un 5% y un 7% [34].

El papel relevante esperado, dentro del nuevo paradigma energético, de la energía solar fotovoltaica (FV) se basa en: En primer lugar en los rápidos avances de la investigación y el desarrollo en el campo fotovoltaico que han permitido espectaculares altas eficiencias para la conversión de luz a electricidad. En segundo lugar, en el desarrollo de una industria de producción de costes, principalmente en China, para las células fotovoltaicas y los paneles fotovoltaicos, lo que resulta en un logro prematuro de un hito mítico: la paridad de la red.

Los argumentos en contra de la viabilidad de la tecnología FV ahora están obsoletos, abriendo las puertas para su implementación a gran escala, particularmente en los países de economía emergente

1.4. Baterías

Uno de los componentes más importantes de un sistema desde el punto de vista de su confiabilidad de suministro es la batería, su principio de funcionamiento consta de la transformación de energía eléctrica en energía química en el momento de la carga, y en la transformación de energía química nuevamente en energía eléctrica en su descarga.

Es de suma importancia que la batería de un sistema esté dimensionada correctamente para evitar sobrecargas o descargas profundas disminuyendo la vida útil de ésta, la capacidad total de la batería o del conjunto (banco de baterías) no tiene que ser igual al de la carga que alimenta, pero sí debe asegurar una autonomía de al menos 5 días . Por ejemplo, en un sistema aislado que únicamente utilice energía solar fotovoltaica, se tendrá que almacenar electricidad para el consumo nocturno o para periodos donde no se genere suficiente, como podría ser una serie de días nublados.

Si se trata de un sistema híbrido en este caso en particular un sistema hidrocínético, existirá intervalos de tiempo donde los paneles solares no producirán la suficiente energía para abastecer la carga, ya sea durante las noches o en días nublados, o cuando la velocidad del fluido no sea suficiente para producir energía mediante la turbina eólica será de gran utilidad tener una reserva de energía en la batería.

La mayoría de sistemas aislados o híbridos utilizan baterías, como excepción se podría hablar de un sistema solar fotovoltaico de bombeo de agua y almacenamiento

de ésta en una presa para su posterior turbinado, por otro lado un sistema de alumbrado público que al contrario necesita de una batería que se carga durante el día y se descarga por la noche creando así un almacenamiento de energía primaria y por tanto de electricidad. La tecnología de plomo ácido es la que más se utiliza hoy en día en aplicaciones solares fotovoltaicas debido a su robustez y bajo coste, aunque al final de la vida útil de la instalación, la batería suele tener un coste igual o en algunos casos mayor al coste de los paneles solares.

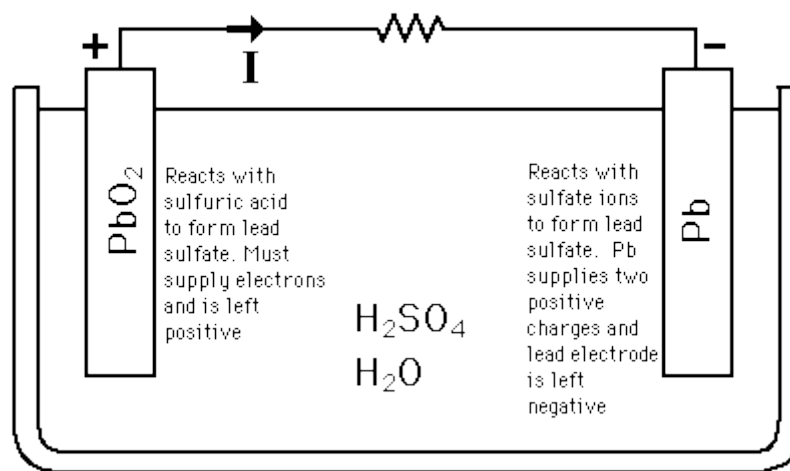


Figura 9: Batería de plomo ácido

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>

Otro tipo de batería comercial son las de níquel-cadmio, níquel e hidruro metálico y las de Li-ion, aunque este tipo principalmente se utiliza en electrónica de consumo o en telecomunicaciones y en la actualidad la compañía Tesla sigue invirtiendo recursos en investigación de nuevas baterías que reduzcan espacio y maximicen capacidad.

En el sistema híbrido en estudio es de suma importancia el uso de baterías ya que se trata de una comunidad aislada de la red y no siempre los sistemas podrán abastecer al cien por ciento de la demanda, sobretodo en horas pico de consumo o en el peor escenario climático. Además de esto, las baterías deben almacenar

energía para cubrir excesos de demanda. Las baterías serán principalmente cargadas por los paneles fotovoltaicos en el día y en la noche por el sistema hidrocínético.

Funcionamiento de una batería de plomo y ácido

Las baterías de plomo y ácido están formadas por múltiples células individuales cada una con un voltaje nominal de 2V. Comercialmente se unen estas células internamente en serie formando bloques, por ejemplo 12 células formarían una batería o bloque de 24V. En el caso de grandes tanques de baterías, las células individuales son usadas en función del tamaño y conectadas entre ellas en serie o en paralelo para conseguir diferentes capacidades y voltajes. En este tipo de batería encontramos diferentes tecnologías, como baterías de gel pero en instalaciones fotovoltaicas es más común utilizar baterías con electrolito líquido, como lo son las de plomo y ácido [34].

Características de la batería

La capacidad C_u de una batería es la cantidad de energía que puede ser descargada bajo condiciones adecuadas de descarga hasta que ésta esté totalmente descargada, mientras que la capacidad nominal viene determinada por el número de baterías o células conectadas en paralelo [34].

Ésta siempre está asociada con la corriente de descarga o con el tiempo de descarga. Por ejemplo si el total de la energía almacenada en una misma batería se descarga en 10 horas habrá una corriente mucho mayor que si lo hace en 100 horas. La corriente, como la capacidad, depende del tiempo de carga o descarga. Mientras la corriente de carga se produce en los “generadores”, la capacidad de descarga

depende de la demanda de la carga o población. Normalmente la capacidad de descarga de una batería de un sistema solar sigue la siguiente fórmula [34].

$$Q = \frac{C_u}{V} = \frac{E \cdot n}{V}$$

Donde,

- Q, es la capacidad de descarga en kAh
- Cu, es la energía de la batería en kWh
- E, es la energía demandada en kWh
- n, es el e número de días sin suministro
- V, es el voltaje de nominal del tanque de baterías,

En el caso del voltaje nominal de una batería de plomo ácido es de 2V por célula, y éstas se unen en serie formando baterías de 12V o 24V generalmente, o 48V como en este caso. El voltaje en los electrodos varía según las condiciones de trabajo, de tal modo se deben proteger la batería y para ello se utilizan dos límites. El primero de ellos se aplica durante la carga de la batería, conocida como el voltaje límite de carga, siendo el valor máximo permisible. Mientras que en la descarga el valor mínimo es conocido como voltaje mínimo de descarga. Del control de éstos se ocupará el regulador o controlador de carga [34].

El factor de carga indica la relación entre la carga suministrada a la batería y la carga descargada. El valor ideal sería 1, pero suele ser superior debido a las pérdidas en el interior y exterior de la batería. El valor inverso a este factor sería el rendimiento de carga que está entre sobre el 80% y por debajo del 98%. En el caso de las pérdidas por almacenamiento, el rendimiento se encuentra entre un 70 y un 85%, dependiendo del método de carga [34].

Para mejorar el rendimiento se puede utilizar un controlador MPP (seguidor de máxima potencia), en caso que las condiciones ambientales lo ameriten o un

controlador PWM que no es más que un convertidor CC/CC que haría trabajar a los paneles fotovoltaicos siempre en la máxima potencia, a pesar de que el estudio de un sistema con seguidores de máxima potencia no está dentro del alcance de este documento, es una técnica que ayuda a optimizar cualquier instalación fotovoltaica, para determinar el punto de máxima potencia que varía durante el día es necesario conocer a fondo las condiciones ambientales del lugar donde se instalará el generador, tales como la temperatura diaria mensual, Irradiancia media mensual entre otras.

A continuación se muestra la diferencia entre un regulador de carga con un algoritmo de seguimiento MPPT y PWM.

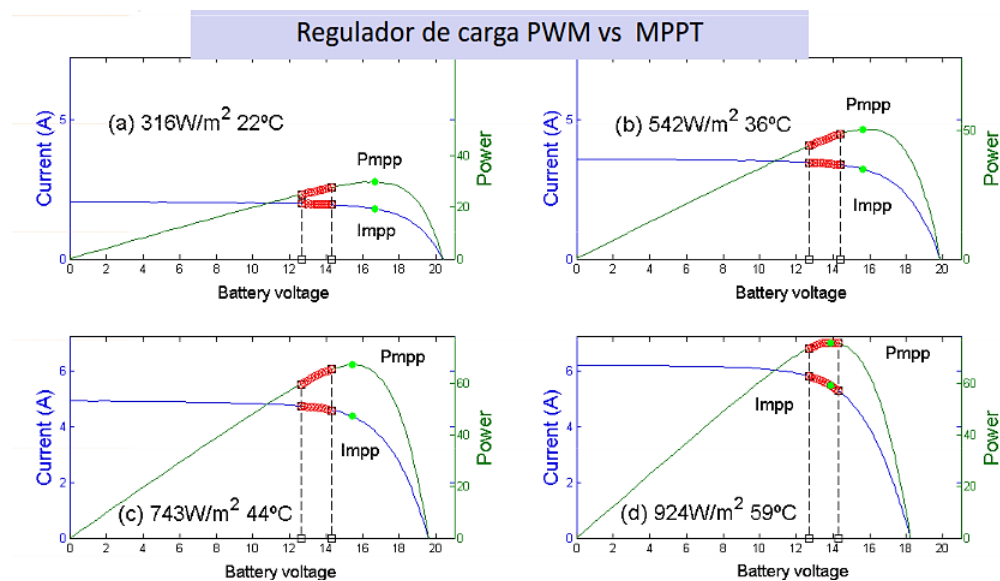


Figura 10: Condiciones ambientales, regulador de carga MPPT y PWM

Fuente: POWER GAIN AND DAILY IMPROVEMENT FACTOR IN STAND ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING CHARGE REGULATORS. CASE STUDY: MEDITERRANEAN CLIMATE. F. J. Muñoz*, G. Jiménez, M. Fuentes. Journal of Solar Energy Engineering. NOVEMBER 2013, Vol. 135

Para el correcto dimensionamiento del regulador de carga y por ende del acumulador se deberá elegir adecuadamente un tipo de controlador, como se menciona dependerá de las condiciones del sitio, las mismas que deben ser monitorizadas diariamente por al menos un año. Esto se debe a la fuerte dependencia de una célula

solar con respecto a las condiciones atmosféricas, la corriente de cortocircuito varía linealmente con la Irradiancia es decir, a mayor Irradiancia mayor corriente I_{sc} , por otra parte el voltaje de circuito abierto de una célula V_{oc} varía inversamente lineal con el cambio de la temperatura ambiente del lugar, o sea a mayor temperatura menor voltaje V_{oc} .

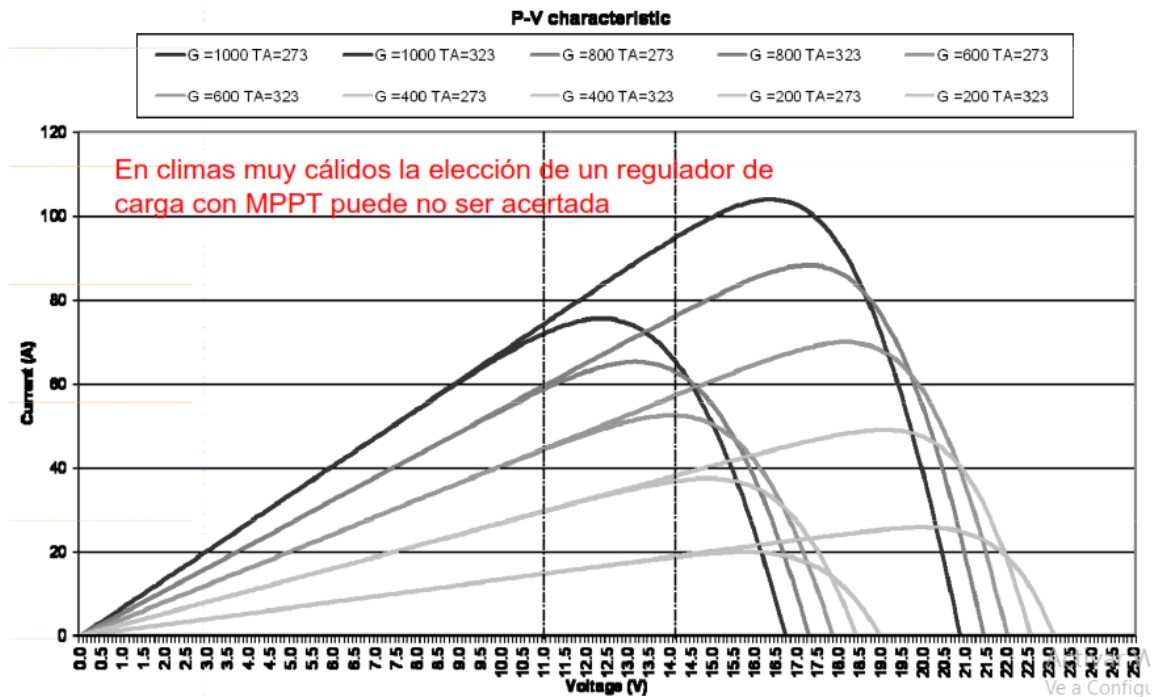


Figura 11: Variación de la curva P-V de una célula con respecto a la Irradiancia G

Fuente: Grupo IDEA Universidad de Jaén

Según el pliego de condiciones técnicas del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), se recomienda que los acumuladores sean de plomo-ácido preferentemente estacionario y de placa tubular, no se permite el uso de baterías de arranque. En este apartado se explica brevemente el dimensionamiento que podría tener tanto el acumulador como las características que debe tener un regulador, más adelante nos adentraremos al modelo matemático de una batería de tal manera que se logre relacionar su óptimo con respecto al sistema en general.

2. CAPÍTULO II SISTEMAS HÍBRIDOS

2.1. Introducción

Hoy en día el principal factor del desarrollo tanto económico como social es la energía en cualquier país. Hoy en día el 80% de la demanda mundial de energía se satisface mediante combustibles fósiles según (Muller-Furstenberger y Wagner, 2007).

Teniendo en cuenta el agotamiento del petróleo, el aumento de la población y el aumento de la demanda de energía, la generación de energía eléctrica ha entrado en una nueva fase de evolución, que puede caracterizarse principalmente por la creciente preocupación por los cambios climáticos, por una transición de una economía basada en hidrocarburos que actualmente es un desarrollo no sostenible.

Por una utilización eficiente de la energía (Al-Saleh, 2009, Roth et al., 2009, Eastin et al., 2010, Bazán-Perkins y Fernández-Zayas, 2008, Bouffard y Kirschen, 2008, Matutinovic, 2009, Midilli et al. 2006). Recientemente, con el fin de alcanzar el desarrollo sostenible, la humanidad necesita ser constante en el camino de la sociedad con bajas emisiones de carbono (Sioshansi, 2010; Kammen, 2010).

Es por eso que con el fin de hacer un uso eficiente de la energía eléctrica existe un creciente interés en optimizar el diseño de asentamientos urbanos mediante la explotación de fuentes naturales de energía (solar e hidráulica) y el desarrollo de sistemas de gestión de edificios (Gugliermetti y Bisegna, 2006), Kampf y Robinson, 2009, Kolokotsa et al., 2011, Luna-Rubio et al., 2009, di Stefano, 2000, Wong et al., 2005).

Además, las redes de energía eléctrica se encuentran en una fase de transición en la que éstas deben ser más flexibles y dinámicas a todos los niveles, desde la planta

de generación hasta el cliente, para permitir la generación distribuida (principalmente a partir de fuentes renovables), promover el uso eficiente de la energía a nivel del cliente, y alcanzar una respuesta inteligente a la demanda (Castillo-Cagigal et al., 2011; Järventausta et al., 2010) [36].

Actualmente la generación distribuida junto con las redes inteligentes está entre los campos de estudio más amplio ya que al tener una fuente renovable cerca del consumidor se evitan pérdidas de potencia por transporte de energía y sobre todo aumenta la confiabilidad del sistema. En aldeas alejadas de centros urbanos sería un avance muy favorable ya que llevar una línea eléctrica decenas de kilómetros para una carga que no se considera tan alta no es rentable y por ende las comunidades no tienen el privilegio de contar con electricidad.

La tecnología para la producción de energía a partir de fuentes de energía alternativas ha experimentado un desarrollo considerable (Michalak y Zimny, 2011; Razykov et al., 2011). Por otra parte, una nueva tendencia a aumentar la eficiencia y fiabilidad de las redes de energía eléctrica en fuentes de energía alternativas incluye el uso de la tecnología de la información y la comunicación (TIC), de esta manera se mejora la utilidad eléctrica haciéndose más dinámica y flexible y promover el almacenamiento distribuido de energía (Rahimi e Ipakchi, 2010). Hoy en día, la Tierra parece tener suficiente energía para cubrir la demanda de energía eléctrica del mundo (15 TW) con la tecnología actual (Cho, 2010).

Hoy en día es técnicamente posible extraer 1,6 TW de forma hidroeléctrica, 3,8 TW de geotermia, 9 TW de biomasa, 20 TW de viento y más de 50 TW de energía solar (Cho, 2010) [36].

Debido a la naturaleza estocástica de algunos recursos naturales (sol y agua) la sociedad con bajas emisiones de carbono requerirá de una solución que implique la participación de varias fuentes de energía renovable, con el propósito de desplazar los combustibles fósiles por medio de estas fuentes según expertos se prevé que será necesaria una integración de múltiples fuentes de energía que trabajen juntas por ejemplo (hidráulica, geotérmica, Biomasa, eólica, solar, hidrógeno, nuclear y de respaldo un generador que opera con combustible fósil) en la generación de energía mediante sistemas de energía descentralizados (Devezas et al., 2008, Moslehi y Kumar, 2010; Kaundinya et al., 2009).

Cuando un sistema de energía incluye dos o más energía fuentes se denomina híbrido; Es ampliamente conocido que híbrido sistemas energéticos (que incluyen fuentes de energía alternativas) a veces presentan menores costos y mayor confiabilidad que sistemas que utilizan una sola fuente de energía alternativa (Dalton et al., 2009, Ylmaz et al., 2008).

Un dimensionamiento adecuado de cada componente en el híbrido energía es un factor clave para su viabilidad técnica – económica del sistema. Por lo tanto, la penetración de fuentes renovables en el mercado energético depende principalmente de las metodologías utilizadas para diseñar este tipo de sistemas híbridos de energía de una manera óptima.

Estos problemas de optimización a la elección del "mejor" conjunto de componentes del sistema un espacio de búsqueda o conjunto de posibles soluciones (es decir, un conjunto de posibles componentes y su tamaño en el sistema de energía híbrido); esto implica seleccionar uno o más problemas de optimización, elegir una función objetivo e identificar un conjunto de restricciones. La función objetivo y las restricciones deben ser funciones de una o más variables de optimización. Además,

el problema aumenta su complejidad debido a respuesta característica no lineal en componentes del sistema, disponibilidad estocástica en algunas fuentes renovables (Irradiancia, o velocidad de corrientes de agua), y el número de restricciones de diseño y variables de optimización [36].

2.2. Arquitectura de un Sistema Híbrido

Un sistema híbrido es un conjunto de subsistemas energéticos que generan energía eléctrica a partir de un recurso renovable, su arquitectura se muestra en la fig. 12. Este tipo de sistemas tienen una unidad de control centralizado la cual asegura el abastecimiento continuo de energía dependiendo del recurso presente. Sin embargo, también puede suministrar una carga de CC o ambos al mismo tiempo.

Las fuentes de energía pueden ser alternativas (es decir, renovable) así como convencional (es decir, red eléctrica o Diésel), o componentes de almacenamiento de energía (es decir, batería Banco o pilas de combustible); de esta manera, la debilidad de algunos fuentes de energía se complementa con los puntos fuertes de otras fuentes de origen renovable y convencional.

Para ilustrar esto, a pesar de la impredecible disponibilidad de fuentes de energía (como solar e hidrocínética), por lo general, presentan patrones complementarios (Tina y Gagliano, 2010; Yang Et al., 2003).

El uso que se le da a un sistema híbrido puede ser de dos maneras:

Que esté en un centro urbano y requiera conexión a red cuando las condiciones ambientales no sean idóneas para sus fuentes renovables o.

Un sistema autónomo aislado de la red, que en caso de necesitar apoyo en condiciones ambientales desfavorables tome energía del sistema de almacenamiento que es el caso en estudio.

En este caso, al tratarse de un sistema híbrido compuesto por un sistema hidrocinético y fotovoltaico, es necesario que como fuente de apoyo se requiera de almacenamiento (banco de baterías) y un sistema de generación diésel, este último para ayudar al sistema en caso de arranque en negro (black start) cuando no existe condiciones ambientales suficientes para arrancar y tampoco existe carga en la batería [36].

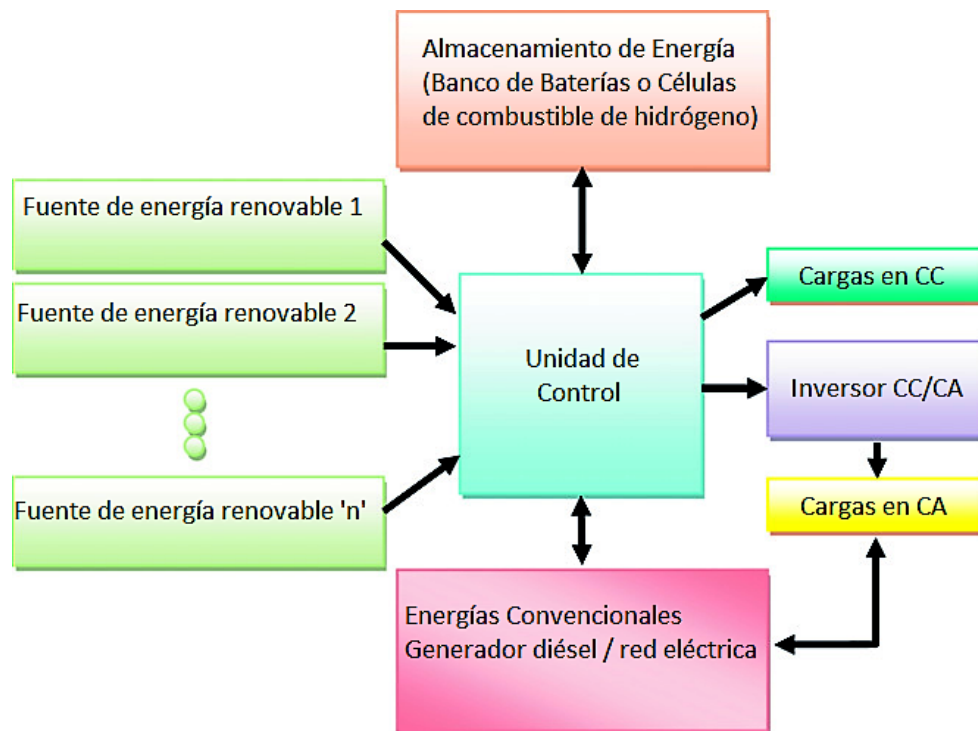


Figura 12: Esquema de un sistema híbrido

Fuente: [36]

2.3. Métodos de diseño de un Sistema Híbrido

Para poder clasificar de manera adecuada un método de dimensionamiento de sistemas híbridos lo idóneo es hacerlo de acuerdo al nivel de complejidad.

- Probabilístico
- Analítico
- Iterativo
- Híbrido

2.3.1. Métodos Probabilísticos

De todos los métodos de dimensionamiento de sistemas híbridos, los probabilísticos suelen ser los más sencillos de analizar; sin embargo, los resultados obtenidos por estas técnicas no son las más adecuadas para encontrar la mejor solución ya que no abarcan todos los elementos correspondientes.

Generalmente, en esos métodos se toman en cuenta una o dos prestaciones del sistema optimizar los indicadores para dimensionar los componentes del sistema estudiado. Estos métodos implican el desarrollo de modelos apropiados para generación y / o carga seguida por una combinación de estos modelos para crear un modelo de riesgo el cual debe ser analizado en distintas situaciones para alcanzar un resultado promedio.

Por ejemplo, en la referencia [37] se presentan dos métodos de clasificación llamados "Escenario 1" y "Escenario 2" utilizado para dimensionar el sistema híbrido que consta de energía solar y eólica autónomo. Ambos métodos evalúan el rendimiento de los sistemas por medio de la relación de energía a carga (ELR) y de la batería a relación de carga (BLR); Sin embargo, la primera se basa en la eficiencia media mensual y el segundo en el peor de los escenarios.

Basado en el costo total del sistema, en [37] se compararon estas metodologías con una nueva denominada "Escenario 4". La propuesta se trata de un proceso iterativo, donde las desviaciones del rendimiento del sistema se utilizan para estimar la configuración óptima del mismo. Esta metodología alternativa lleva a optimizar los

sistemas técnicos - económicos en [37] y [38] se sugirió tercera fuente de energía (fuente auxiliar) al sistema en lugar de aumentar el tamaño del hardware excesivamente para las peores metodologías mensuales

Informó. Otro enfoque probabilístico se sugiere en Yang Et al. (2003), donde los autores señalaron que para obtener una evaluación precisa del rendimiento en un híbrido PV- Sistema de energía eólica, un año meteorológico típico adecuado

(TMY) debe ser estudiado y utilizado para evaluar el sistema actuación.

Finalmente, un nuevo enfoque probabilístico basado en la convolución utilizando la función de densidad de probabilidad (PDF) con el fin de evaluar el rendimiento a largo plazo de sistemas de energía solar-eólica (Tina y Gagliano, 2010, Tina, 2006).

2.3.2. Métodos Analíticos

Estos métodos describen el tamaño del sistema según su viabilidad, están representados por modelos computacionales. Por ende el rendimiento del sistema se puede evaluar para un conjunto de componentes y/o tamaño del mismo. La mejor configuración de un sistema de energía híbrido se determina debido a un índice de rendimiento único o múltiple de los sistemas analizados.

Para poder simular el comportamiento del sistema el usuario debe obtener una muestra de las variables ambientales de al menos un año, así se podrá obtener una evolución correcta de la muestra y se podrá concluir la viabilidad del sistema y su óptimo. En una revisión reciente y extensa en la referencia [39], se analizaron y compararon diferentes herramientas de simulación computacional de sistemas de energía híbridos.

De acuerdo con la literatura revisada, una herramienta de simulación ampliamente utilizada en la evaluación del desempeño de sistemas híbridos de energía es el Modelo de Optimización Híbrida para Energías Renovables Eléctricas (HOMER), donde se presenta un estudio de viabilidad para un alojamiento turístico de tamaño pequeño o mediano.

2.3.3. Métodos Iterativos

Para evaluar un sistema híbrido mediante este método es necesario realizar un proceso reiterativo hasta alcanzar un modelo óptimo según requieran sus especificaciones de diseño. Un método iterativo es reportado por la referencia [40] donde se obtuvo un sistema híbrido óptimo entre distintas combinaciones de energía renovable para una comunidad rural, minimizando el costo total del ciclo de vida, asegurando la confiabilidad del sistema.

En este trabajo se utilizó un algoritmo numérico basado en el método de Quasi Newton para resolver el problema de optimización (Rao, 1996) [41]. Los algoritmos genéticos (GAs) son la búsqueda global estocástica y la técnica de optimización bioinspirada en el proceso de las especies de evolución natural, que generalmente es robusto en la búsqueda de soluciones óptimas globales en el proceso multimodal y multi-optimización. En la fig. 13 se muestra un diagrama de flujo para la metodología de optimización propuesta en Kaldellis et al. (2009) [42].

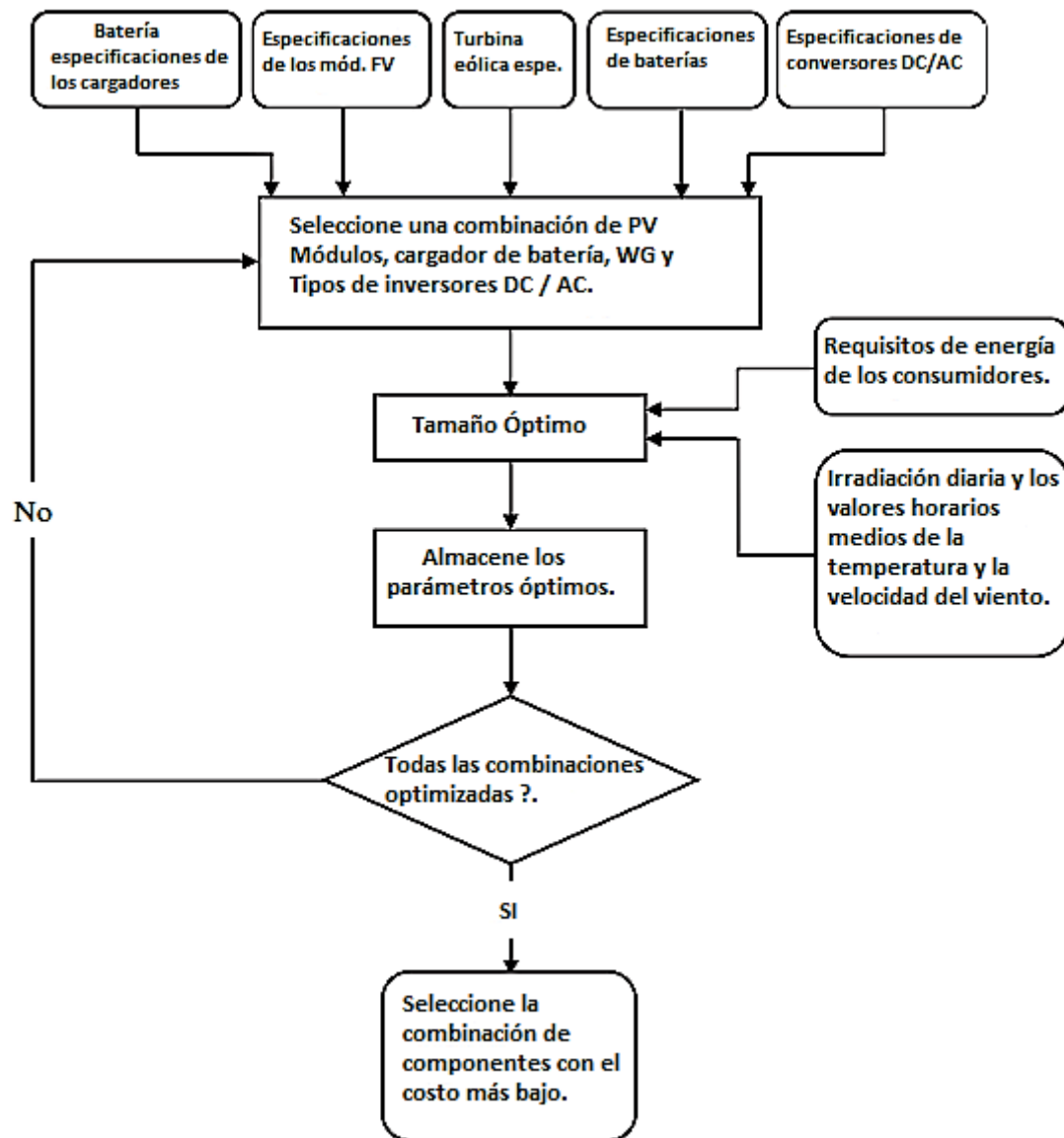


Figura 13: Diagrama de flujo de la metodología de optimización propuesta

Fuente: (Koutroulis et al., 2006)

En este estudio, el costo del sistema se minimizó mediante la carga eléctrica; De acuerdo con las limitaciones de diseño, el tamaño óptimo se logra mediante el proceso de GA de las medidas como se muestra en la fig. 14. Los resultados reportados en [42] muestran que los sistemas híbridos Fotovoltaica – Eólica presentan un costo menor que el fotovoltaico sólo o el sistema de energía eólica. Obras similares se pueden encontrar en [43] y [44], [45] y [47], donde se utilizaron las metodologías de dimensionamiento de energía eólica-PV basadas en GA para

lograr una configuración óptima del sistema. En estos casos, la configuración óptima se calculó mediante un LPSP requerido con una técnica de coste de energía (LCE) nivelada [47].

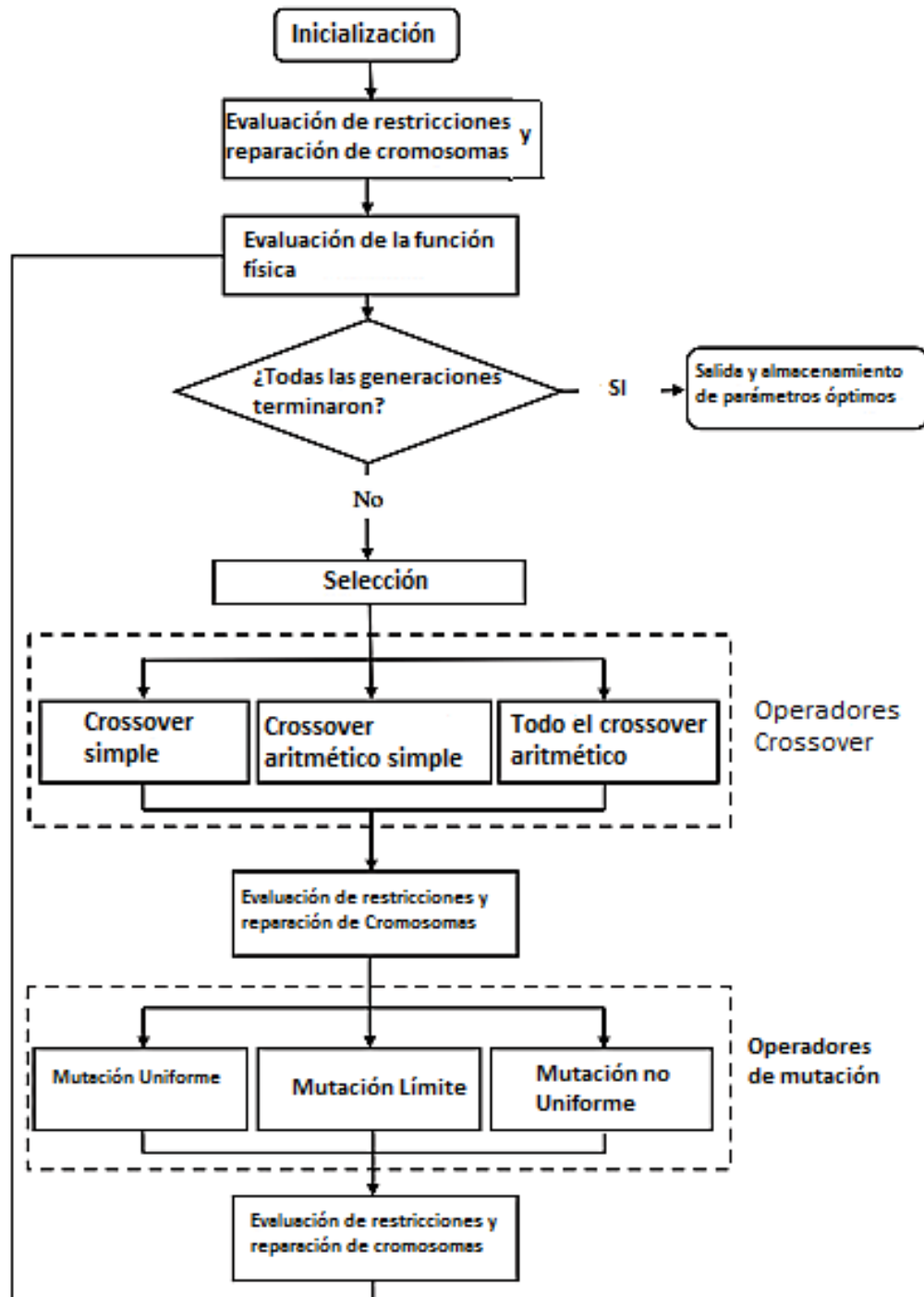


Figura 14: Algoritmo Genético utilizado para el proceso de optimización

Fuente: (Koutroulis et al., 2006)

Por otra parte, otro método de optimización estocástico aplicado al dimensionamiento de sistemas de energía híbridos es la llamada optimización de enjambre de partículas (PSO) [48]. Este procedimiento se inspira en ciertos comportamientos sociales. Para una breve introducción a este método, considérese un enjambre de partículas p , donde la posición de cada partícula representa un posible punto de solución en el espacio del problema de diseño D . Cada partícula se denota por su posición y velocidad; En un proceso iterativo, cada partícula registra continuamente la mejor solución hasta ahora durante su vuelo. Como ejemplo de dimensionamiento óptimo de sistemas de energía híbridos por medio de PSO, se refiere a [49].

Finalmente, en [50] se utilizó OptQuest, disponible en la herramienta de software ARENA 12.0 para resolver el problema de optimización. OptQuest es también un método heurístico iterativo que combina las metaheurísticas de búsqueda tabú, redes neuronales y búsqueda de dispersión en una sola búsqueda.

2.3.4. Métodos Híbridos

Debido a la naturaleza multidimensional en el problema de la optimización, una metodología adecuada para resolver este problema será capaz de resolver la optimización multiobjetivo basada en métodos heurísticos como GA, redes neuronales y búsqueda tabú para mencionar algunos. Sin embargo, en métodos híbridos, los resultados pueden mejorarse utilizando combinaciones de técnicas de optimización [36].

Por ejemplo, en [51], [52], y [53], se modificó GA para obtener un conjunto de soluciones no dominantes de Pareto, las cuales, mediante criterios de selección, eligieron la configuración óptima. En [52], fue doble para minimizar el costo de

energía del sistema y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante su vida útil mediante seis restricciones de diseño diferentes.

Las redes neurales artificiales (RNA) pueden considerarse como modelos matemáticos simplificados de sistemas similares al cerebro, ya que se inspiraron en la operación de sistemas neuronales biológicos [53] y [54]. Una Red Neuronal Artificial es un conjunto de unidades de procesamiento interconectadas individualmente denominadas neuronas. Cada interconexión en la red tiene dos valores asociados a ella: un valor de interconexión y un peso de interconexión. La salida de la neurona es una función de los valores sumados de entrada.

La salida de la neurona es una función de los valores de entrada sumados. Una vez que la RNA ha sido entrenada o calibrada por medio de un algoritmo recursivo (es decir, los pesos de interconexión son ajustados), se pueden presentar nuevos patrones para propósitos de predicción o clasificación. En el diseño de sistemas energéticos, la RNA se ha utilizado en la predicción de la radiación solar diaria total en áreas aisladas donde los registros de datos no siempre están disponibles o en la predicción del rendimiento de un Híbrido [36].

En el dimensionamiento de los sistemas energéticos, la RNA se ha utilizado para mejorar el método analítico de la probabilidad de pérdida de carga (LOLP). Combinadas con GA para mejorar el proceso de diseño y calibración de las RNA y luego generar la curva de tamaño del sistema eléctrico basado en el concepto LOLP.

Para tener una buena aproximación de la viabilidad de un sistema se debe evaluar el rendimiento a largo plazo. Sin embargo, según la cantidad de datos meteorológicos considerados y el modelo probabilístico, los resultados de las metodologías de dimensionamiento pueden no ser precisos. Por medio de métodos

analíticos, el rendimiento del sistema se puede evaluar de una manera precisa. No obstante, cuando se necesita resolver la función multi-objetivos, a veces estos métodos no ofrecen soluciones precisas debido a la convergencia que necesita para obtener un resultado. Para este tipo de problemas, los métodos iterativos e híbridos mejoran los resultados multiobjetivos.

Después de revisar brevemente los diferentes métodos para dimensionar sistemas híbridos se puede observar que estos parecen ser una buena alternativa para integrar fuentes alternativas de energía en el proceso de generación de energía eléctrica. Casi en todos los sistemas revisados que incluyen más de una fuente de energía alternativa y / o convencional, como el generador diésel o la red convencional, se puede notar que presentan un mejor rendimiento que los sistemas que sólo incluyen una fuente de energía alternativa.

Con el fin de convertirse en sistemas de energía híbridos confiables, viables y / o respetuosos con el medio ambiente, podemos ver una tendencia actual en el desarrollo de metodologías de dimensionamiento multiobjetivo; Por lo tanto, es posible asegurar la evaluación de diferentes posibilidades de inclusión de este tipo de sistemas. [55]

3. CAPÍTULO III ANÁLISIS DEL ENTORNO

3.1. Introducción

Hoy en día, la electrificación se considera la clave para el desarrollo de un pueblo debido a que provee empleo y aprovechamiento de la tecnología vigente. Sin embargo los escasos proyectos de electrificación elaborados en zonas remotas ubicadas en países en desarrollo y menos aún en la amazonia resultan en una desigualdad económica y social para los indígenas amazónicos.

Según (AIE y BM, 2015) actualmente más de mil millones de personas no tienen acceso a la electricidad en el mundo. En el Ecuador según ARCONEL, 2015 el índice de cobertura de la red eléctrica es del 97,04% en ese país siendo la Región Amazónica Ecuatoriana la zona con la menor tasa de electrificación. Desde hace pocos años el gobierno ecuatoriano está proponiendo diversas transformaciones sociales enfocadas al buen vivir cuestionan el enfoque del desarrollo *“El único camino para romper el círculo perpetuo de la pobreza es la educación”* [56]. Para ello una nación debe contar con una fuente energética que sea capaz de suplir sus cargas en horas punta y con una confiabilidad tal que cumpla con los reglamentos regionales y nacionales.

A nivel mundial, la forma de llevar energía eléctrica hasta el consumidor es común, desde la cual la generación centralizada es la responsable de proveer de la energía que es transportada hasta las cargas, pero en ciertos casos estas cargas están dispersas y demandan poca energía además de estar geográficamente alejadas del centro de generación, resultan una alternativa no factible desde el punto de vista técnico económico por lo que una red de generación distribuida es la más propicia para suplir dichas cargas y proveer de energía eléctrica a los aldeanos.

Según la referencia [57] La República ecuatoriana ha sido caracterizada como un caso representativo en lo que concierne a la transformación social que cuestionan un enfoque relacionado con el buen vivir y sobretodo en el desarrollo. El sector energético ecuatoriano y el de electrificación son escenarios de controversia en cuanto al buen vivir, actualmente el estado tiene el poder para tomar decisiones tales que se logre el buen vivir, con el cambio de la matriz productiva en el cual se sustenta la transformación de la matriz energética. Para lo cual se sustenta la soberanía energética (Asamblea – Constituyente de 2008, SEMPLADES, 2013).

En los documentos rectores del sector eléctrico, basándose en la relación entre pobreza y energía, se identifica la electrificación rural aislada como una de las áreas de interés para el Gobierno (CONELEC, 2013: 105), y se establece que “el Estado garantizará la implementación de programas y proyectos de electrificación en las comunidades indígenas y rurales de difícil acceso” (Asamblea-Constituyente, 2015: 39). Las Empresas Eléctricas de Distribución (EED), bajo el mandato del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), son así quienes deben garantizar el servicio eléctrico a todas las poblaciones de su zona geográfica de responsabilidad [57].

Es por esa razón que se ha elegido un sitio perteneciente a la amazonia ecuatoriana para evaluar sus condiciones ambientales de tal manera que sea posible determinar la viabilidad de un sistema híbrido compuesto por energías renovables.

3.2. Proyectos de electrificación rural aislada

Con el fin de analizar cómo se pretende alcanzar el desarrollo práctico a partir de las visiones que se tienen hoy en día con respecto a proyectos de electrificación rural aislada se presenta un resumen de una investigación llevada a cabo (2013 – 2016),

por miembros del equipo encargado del diseño de proyectos de electrificación rural (RAE), se estudia un proyecto financiado por el banco interamericano de desarrollo (BID) y ejecutado por el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables del Ecuador (MEER) conjuntamente con la Fundación Ecuatoriana de Tecnología Apropiable (FEDETA).

En este estudio presentan resultados de entrevistas realizadas a los aldeanos en comunidades ecuatorianas amazónicas, esto con la finalidad de establecer de alguna manera su vínculo en cuanto a sus necesidades energéticas tales como: Cantidad de potencia que necesitan en promedio, energía diaria consumida, hábitos de consumo, etc. Estas zonas se caracterizan por ser fuentes de explotación de recursos como oro, caucho y petróleo. En el marco del cambio de la matriz energética impulsado por el Estado, la generación distribuida es la más adecuada para abastecer a este tipo de aldeas según la Asamblea Constituyente de 2015, se calcula que entre los años de 2002 y 2010 se instalaron en la RAE más de 4.000 sistemas solares fotovoltaicos, tecnología autónoma con mayor utilización en el país, esto señala que en la zona existe un buen recurso solar que da lugar a la viabilidad de una instalación solar, asimismo en la zona se encuentra uno de los ríos más caudalosos del país el río Napo, en la cuenca del Río Amazonas actualmente se encuentra operativa la central hidroeléctrica más potente del país con 1500 MW de potencia instalada.



Figura 15: Vista del Río Napo desde la comunidad de Cruzchikta

Fuente: Wikipedia.org

El modelo de gestión de los sistemas energéticos resulta, por tanto, una de las mayores preocupaciones actuales de los actores que trabajan en el sector de la electrificación rural en Ecuador, siendo uno de los componentes principales del proyecto caso de estudio. Para ello, se buscan soluciones energéticas viables técnicamente, rentables socialmente (beneficios sociales mayores o iguales que los costos sociales) y sostenibles financieramente.

Sin embargo, los requerimientos de los organismos financiadores para garantizar la sostenibilidad financiera de los proyectos de electrificación rural en la RAE son muy difíciles de asumir, debido a las escasas vías de acceso (a muchas comunidades solo se puede acceder mediante transporte aéreo o fluvial) y la alta dispersión de las poblaciones. Se argumenta entonces que los altos costos de operación y mantenimiento de los sistemas energéticos no compensan los mínimos de rentabilidad social.

Se terminan así reduciendo los beneficios de los proyectos de electrificación rural aislada a la dimensión económica, tal y como ejemplifica el hecho de que resulte apremiante cuantificar monetariamente todos los beneficios sociales que brinda la electrificación, y se valore como uno de los elementos más relevantes dentro del modelo de gestión la capacidad de pago por el servicio eléctrico por parte de las comunidades rurales [58].

Para las poblaciones indígenas amazónicas, la electrificación de sus comunidades constituye una prioridad. Pero sus aspiraciones en torno a la electrificación varían.

Mientras que las comunidades ubicadas en zonas petroleras aspiran a contar con un servicio energético que pueda abastecer sus nuevas lógicas de consumo pero que a la vez sea medioambientalmente sostenible, para las comunidades donde no existe todavía intervención petrolera la electrificación descentralizada con energías renovables puede suponer, paralelamente, un mecanismo para enfrentar el extractivismo [58].

La generación distribuida compuesta de energías renovables constituye una alternativa que es capaz de mejorar la calidad de vida de los aldeanos amazónicos, además de eso para mejorar aún más el sistema se puede implantar un sistema híbrido capaz de aprovechar al máximo los recursos naturales que abundan en la zona tales como: recurso solar y recurso hidroeléctrico (hidrocinético). Un aspecto muy importante que señala en la referencia [58] es que para tener un resultado positivo ante un proyecto de energías renovables en zonas rurales es que exista una capacitación adecuada por parte de los técnicos instaladores, ya que si no es así el sistema no podrá cumplir su ciclo de vida útil.

Esto implica el diseño de proyectos de electrificación de abajo-arriba; proyectos que integren y contribuyan a las aspiraciones y valores de las poblaciones indígenas amazónicas y aporten al mismo tiempo a la construcción de alternativas energéticas no solo económicamente rentables o técnicamente viables, sino, ante todo, sostenibles socialmente y más democráticas. Se requiere por tanto, una perspectiva multinivel que permita vincular las esferas locales y nacionales de la electrificación rural. Una mirada que reconozca las visiones de las poblaciones indígenas amazónicas, no solo con la finalidad de integrarlas a las lógicas y prácticas de la electrificación rural, sino para transformarlas [58].

3.3. Selección del sitio

El lugar para el cual se realizará la simulación es “Nuevo Rocafuerte” una parroquia perteneciente al Cantón Aguarico ubicada en la provincia de Orellana en la amazonia ecuatoriana.



Figura 16: Parroquia Nuevo Rocafuerte, provincia de Orellana

Fuente: www.negocioseinversionecuador.com

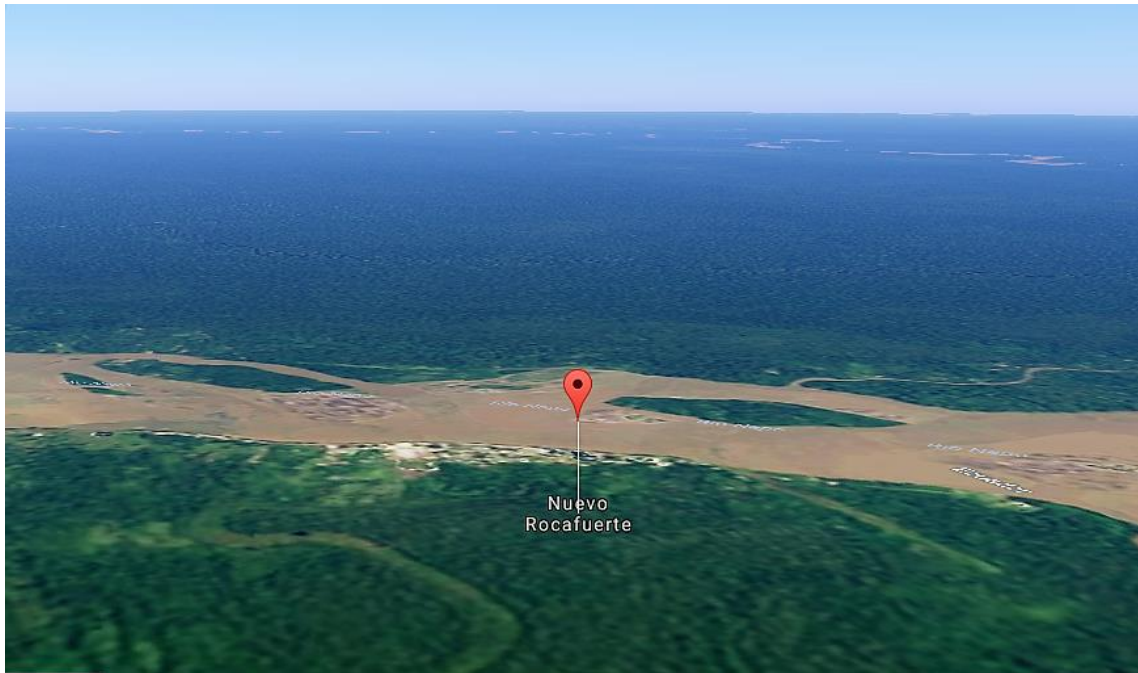


Figura 17: Vista Panorámica de Nuevo Rocafuerte

Fuente: Google Maps

Esta parroquia está situada a una latitud de $0^{\circ}56'00''$ S y una longitud de $75^{\circ}24'00''$ O, su población hasta el último censo realizado en 2010 era de 1024 habitantes según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). La economía se basa en la agricultura y la pesca en su mayoría aunque también se practica la caza y algunos habitantes se dedican a la extracción de maderas finas, en el centro urbano se concentran algunos empleados que trabajan para instituciones del estado¹.

Actualmente según el diario el Comercio, en la zona de Nuevo Rocafuerte existen generadores eléctricos alimentados a diésel que funcionan de 9:00 a 24:00 horas dificultando a la mayoría de aldeanos la posibilidad de disfrutar de un desayuno a gusto ya que la gran parte de la comunidad empieza su día mucho antes de esa hora, llevar redes de energía eléctrica hasta la zona resulta ambiental y

¹ http://www.wikiwand.com/es/Nuevo_Rocafuerte

económicamente inviable ya que se encuentra rodeada por dos reservas naturales a una distancia tan alejada que la única manera de llevar energía eléctrica hasta la zona es con una red de alta tensión, lo cual para un poco más de mil habitantes la potencia no es justificante para realizarlo.



Figura 18: Ubicación Geográfica de Nuevo Rocafuerte

Fuente: Google Maps

Los habitantes de la zona están acostumbrados al estilo de vida actual, aun así no pueden disfrutar de las comodidades que sugiere un sistema de generación de energía eléctrica que sea capaz de suplir su carga las 24 horas del día utilizando energía renovable, en las siguientes imágenes se puede observar el estilo de vida actual de los habitantes de Nuevo Rocafuerte, que a pesar de no tener electricidad no dejan atrás los hábitos que se han prolongado tras generaciones, habitantes de la zona señalan que para celebrar cualquier tipo de festividad las familias salen del pueblo o la celebran en el día:



Ilustración 1: Nuevo Rocafuerte en la noche

Fotógrafo: César Morejón C.



Ilustración 2: Tendido eléctrico en el centro urbano

Fotógrafo: César Morejón C.

3.4. Estudio de la demanda

En lo referente al comportamiento diario de la demanda se marcan categorías como residencial, industrial, comercial y de alumbrado público a pequeña escala, ya que los hábitos de los lugareños no varía sustancialmente con respecto a la ciudad más cercana que es Orellana, pero si su potencia instalada y la energía requerida. Según la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC), la punta o el máximo de la demanda nacional se produce entre las 19:00 a 20:00, y la mínima entre la 01:00 y las 05:00, ya que no se cuenta con datos exactos de la demanda de los habitantes de la zona, se hará una aproximación a la demanda de los ecuatorianos.

A continuación se indican las curvas de carga del S.N.I. para un día laborable (lunes) para uno semi laborable (sábado) y para un día festivo (domingo). La potencia se expresa en por unidad (p.u.) de la máxima del día laborable.

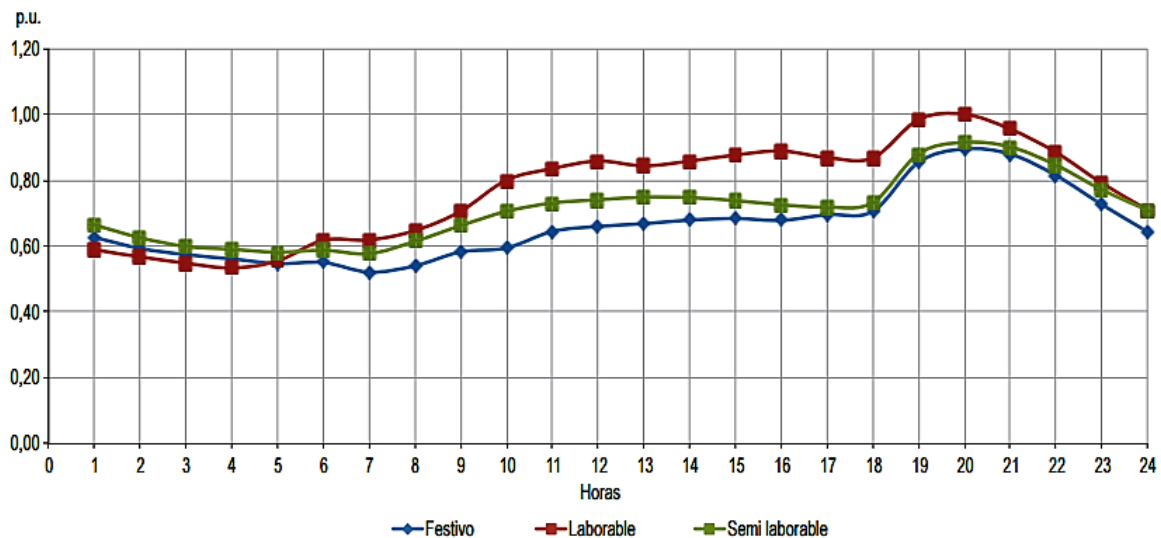


Figura 19: Curva de demanda diaria Nacional

Fuente: Plan Maestro de Electrificación (CELEC EP)

Se puede observar que en un día laborable la demanda es la más alta, los días festivos y semilaborables siguen el mismo patrón así que se tomará en cuenta el comportamiento de la demanda para un día normal laborable. La diferencia de la

curva real de carga de los habitantes de Nuevo Rocafuerte es que en el periodo de tiempo desde las 24:00 hasta las 09:00 no cuentan con energía eléctrica por lo que esa parte de la curva será cero. Para poder aproximar la potencia de un hogar tipo en esta comunidad es necesario especificar el tiempo diario de consumo que requiere el sistema, al tener la potencia se multiplica por el número de horas que estará en uso cada artefacto obteniendo de esa manera la energía diaria que necesita el consumidor expresada en Vatios hora diarios (Wh/día).

Se tomará en cuenta un grupo de cargas típico de un hogar ubicado en sectores rurales, se supone el uso de iluminación LED y refrigeradores eficientes de tamaño reducido, a continuación se presenta la tabla de carga en corriente alterna para el sistema, no se analizan cargas en corriente continua ya que no son comunes aún para este tipo de aplicaciones.

Tabla 3: Consumo de cargas en corriente alterna

Carga	Cantidad	Corriente (A)	Potencia (W)	Horas de uso/día	Días de uso/semana	A.h. promedio semanal	Consumo semanal (Wh)
Bombilla LED	3	0,1	10	4	7	0,4	280
Televisor 14"	1	0,2	25	6	7	1,2	1050
Radio	1	0,15	20	3	7	0,45	420
Cargador celular	1	0,05	5	5	3	0,25	75
Despertador	1	0,05	5	24	7	1,2	840
Potencia Instalada (W)	Potencia simultánea (W)	Energía semanal (Wh)	Pérdidas en inversor	Energía mensual (Wh)			
65	52	2665	5%	10127			

3.5. Estudio del Recurso Natural en la zona

Se obtiene el recurso solar existente en la zona, a pocos kilómetros de Nuevo Rocafuerte (tabla 4).

Tabla 4: Irradiancia correspondiente a la comunidad de Tiputini en la provincia de Orellana

Fuente: Atlas solar del Ecuador

NREL CSR Solar Model Output: TIPUTINI, ORELLANA, ECUADOR

Cell Id ->	276011																
	Cell ID	Lon.	Lat.														
Month				Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual	
Direct	276011	-75,55	-0,75	2875	2215	2215	1885	2215	1885	2545	2875	3535	3205	3205	3865	2710,0	
Global	276011	-75,55	-0,75	5015	4840	5015	4340	4340	4160	4340	4750	5190	5190	5015	5190	4782,1	
Latitude Tilt	276011	-75,55	-0,75	5015	4840	5015	4340	4340	4160	4340	4750	5190	5190	5015	5190	4782,1	
Diffuse	276011	-75,55	-0,75	2870	3210	3155	3100	2640	2640	2520	2750	2520	2640	2640	2580	2772,1	

En comparativa a continuación se presentan los datos de irradiación proporcionados por la base de datos de la NASA para el periodo desde 1983 hasta 2005, se presentan aproximaciones de los resultados lo cual indica y valida los datos utilizados para la simulación, en la fig. 20 se presenta la irradiación proporcionada por el centro meteorológico de la NASA mediante el software HOMER.

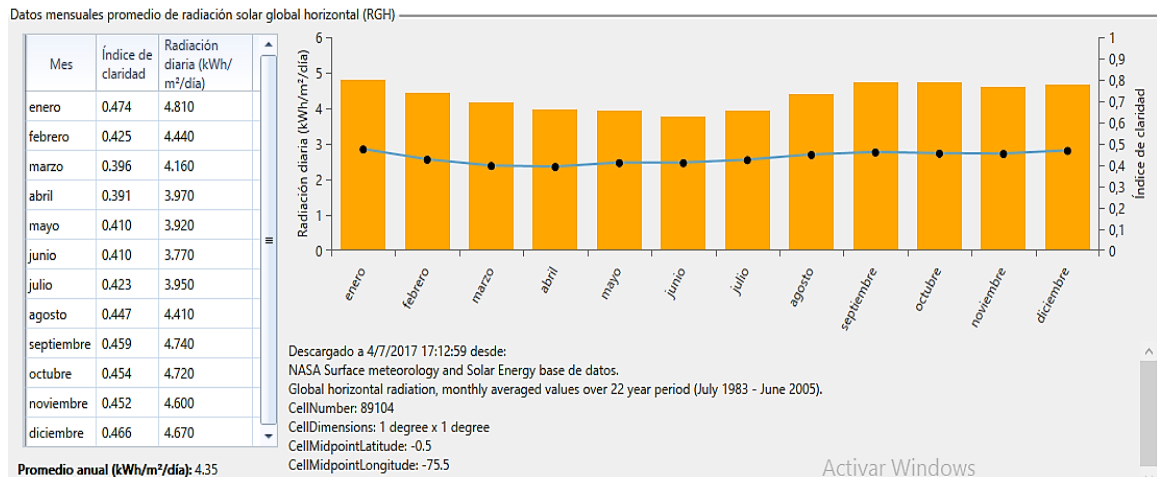


Figura 20: Gráfico de Irradiación media mensual

Fuente: Nasa Surface meteorology and Solar Energy

En cuanto al caudal del río Napo en la zona de Rocafuerte se tienen los siguientes resultados:

ESTACIÓN DE NUEVO ROCAFUERTE CAUDALES MEDIOS MENSUALES MULTIANUALES

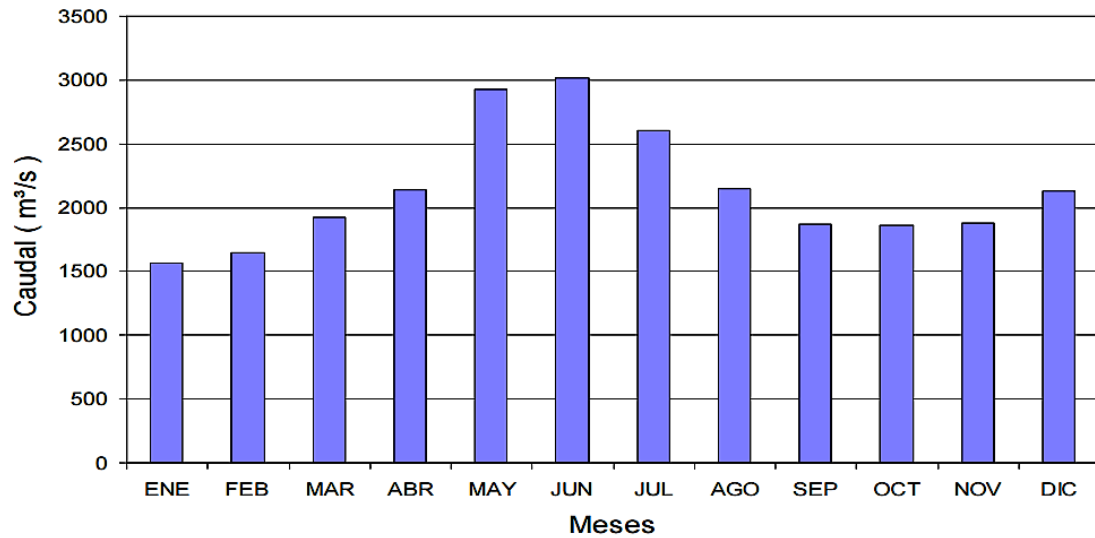


Figura 21: Caudales medios en Nuevo Rocafuerte

Fuente: Estudio de la geodinámica actual del río Napo (amazonía ecuatoriana – peruana) usando datos hidrológicos y de dgps, Roberto Javier Cevallos Mezamiguel Eduardo Ruales Lara, Sangolquí, 4 De Agosto De 2005

ESTACIÓN NUEVO ROCAFUERTE COTAS DIARIAS

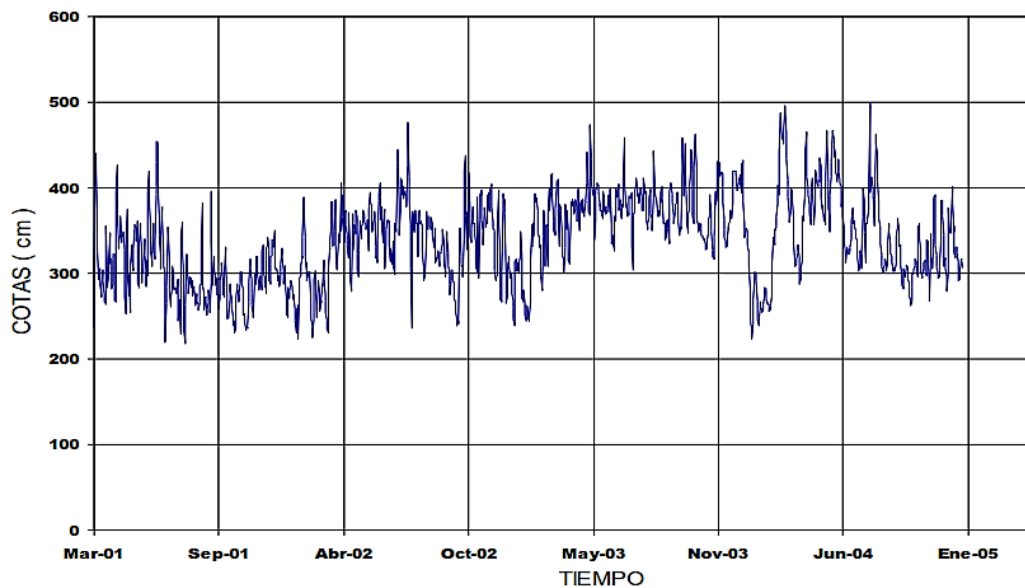


Figura 22: Cotas diarias en Nuevo Rocafuerte

Fuente: Estudio de la geodinámica actual del río Napo (amazonía ecuatoriana – peruana) usando datos hidrológicos y de dgps, Roberto Javier Cevallos Mezamiguel Eduardo Ruales Lara, Sangolquí, 4 De Agosto De 2005

**CALIBRACIÓN DE LA ESTACIÓN DE NUEVO ROCAFUERTE
PERIODO 01/01/98 HASTA 08/05/05**

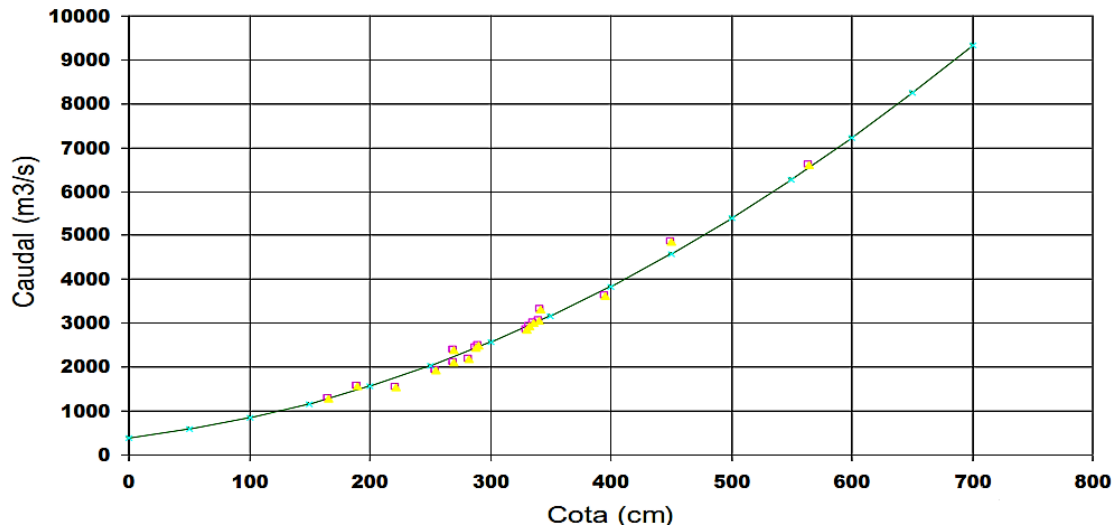


Figura 23: Calibración en Nuevo Rocafuerte

Fuente: Estudio de la geodinámica actual del río Napo (amazonía ecuatoriana – peruana) usando datos hidrológicos y de dgps, Roberto Javier Cevallos Mezamiguel Eduardo Ruales Lara, Sangolquí, 4 De Agosto De 2005

**ESTACIÓN DE NUEVO ROCAFUERTE
CURVA DE DURACIÓN GENERAL**

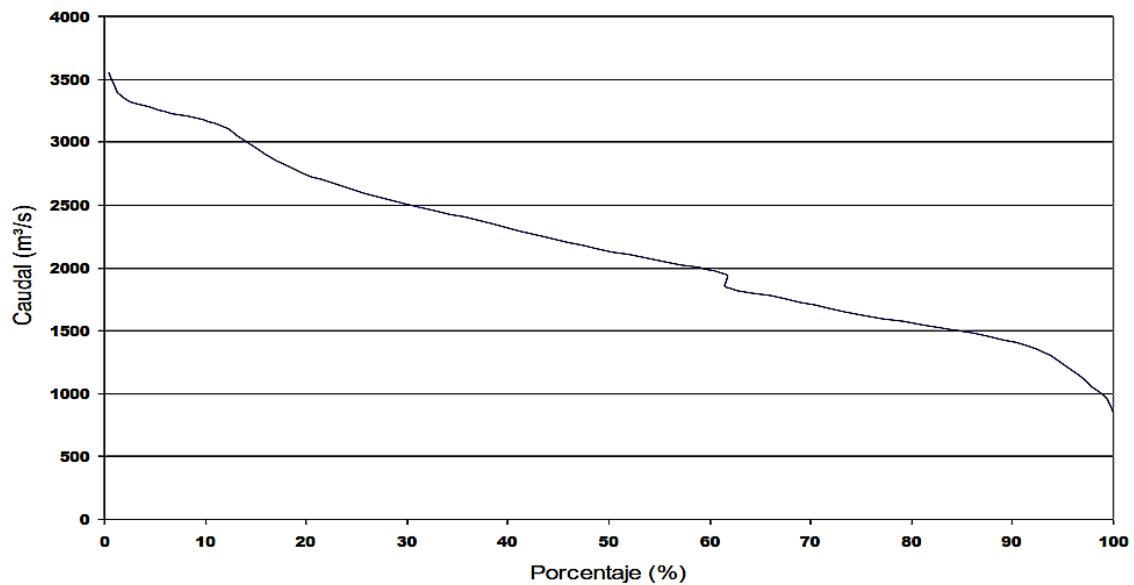


Figura 24: Curva de duración general en Nuevo Rocafuerte

Fuente: Estudio de la geodinámica actual del río Napo (amazonía ecuatoriana – peruana) usando datos hidrológicos y de dgps, Roberto Javier Cevallos Mezamiguel Eduardo Ruales Lara, Sangolquí, 4 De Agosto De 2005

Para poder calcular la velocidad del río en la estación de Nuevo Rocafuerte es necesario conocer el área transversal del río en un punto cercano a la ciudad, para ello se supone una profundidad media de 5 metros al igual que los ríos en las cuencas aledañas según SENAGUA. Una vez calculada la distancia entre las orillas del río en el mismo punto, se multiplica por la profundidad y se tiene el área rectangular transversal, utilizando los datos del caudal presentados anteriormente se divide para el área transversal y se obtiene la velocidad del río.

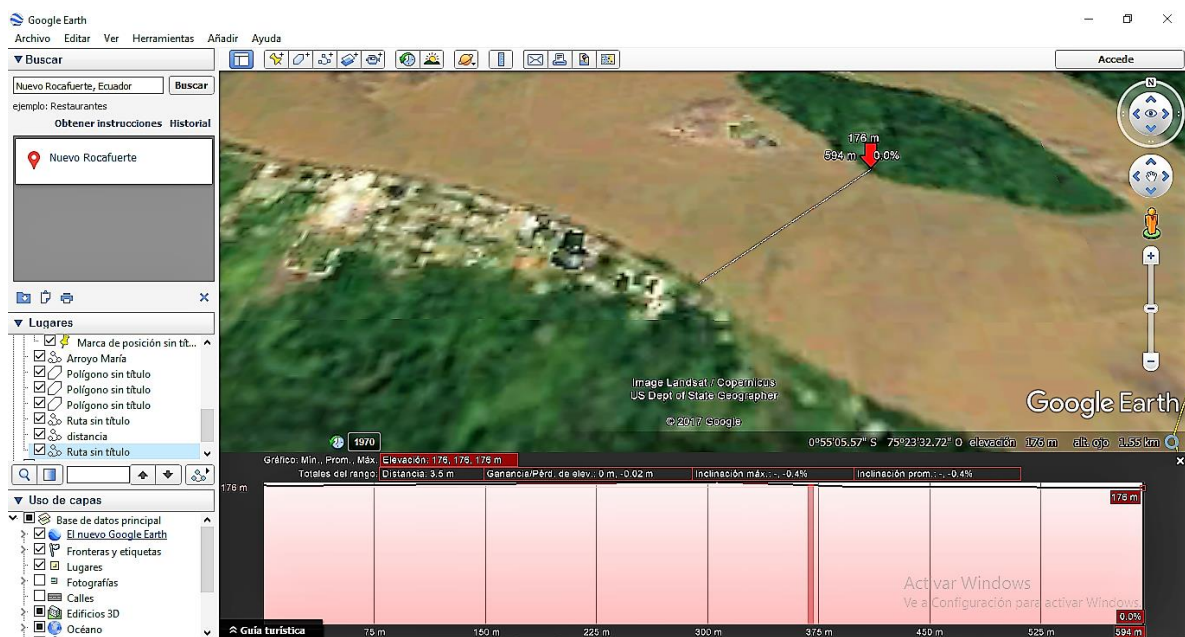


Figura 25: Medición del ancho de la cuenca del Río Napo en la estación de Nuevo Rocafuerte

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Medidas de la cuenca del Río Napo en Nuevo Rocafuerte

Fuente: Elaboración propia

Longitud (m)	Profundidad media (m)	Área de la sección m2
594	5	2970

Tabla 6: Cálculo de la velocidad del Río Napo en la estación de Nuevo Rocafuerte**Fuente:** Elaboración propia

Caudales del río Napo en la estación de Nuevo Rocafuerte (m³/s)	Meses del año	Velocidad del río Napo en la estación de Nuevo Rocafuerte (m/s)
1500	enero	1,8
1600	febrero	1,3
1800	marzo	1,4
2100	abril	1,6
2900	mayo	1,68
3000	junio	1,7
2600	julio	1,84
2200	agosto	1,98
1800	septiembre	1,89
1800	octubre	1,94
1800	noviembre	1,61
2100	diciembre	1,71

4. CAPÍTULO IV DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

4.1. Introducción

El sistema bajo estudio consta de una combinación de tecnologías renovables con el apoyo de un generador diésel, el primer sistema está compuesto por paneles solares que según su ubicación deberán ser diseñados tomando en cuenta el nivel de Irradiancia del sitio (global, directa, difusa y albedo), de la misma manera se deben considerar factores ambientales como humedad, temperatura del lugar y sobre todo la ubicación (latitud y longitud) al tratarse de un sitio con latitud cercana a cero se recomienda levantar los paneles al menos 10° hacia el norte para evitar la acumulación de partículas sobre los paneles.

El estudio debe llevarse a cabo considerando todos los aspectos antes mencionados ya que el mismo está fuera del alcance de este documento, el objetivo es dimensionar el sistema de tal manera de encontrar el punto óptimo que resulte de la combinación de las diferentes tecnologías que lo conforman.

El segundo componente renovable es una turbina de río (hidrocinética) que será capaz de aprovechar un recurso abundante en la zona que es el hidroeléctrico del Río Napo, este sistema es idóneo ya que es capaz de resolver los problemas debido al cambio climatológico existente en la zona al tratarse de un lugar con alta precipitación no es recomendable instalar únicamente un sistema fotovoltaico.

El sistema hidráulico aumentará la confiabilidad del sistema sustancialmente, pero aun así es necesario incrementar la eficiencia del sistema.

Por otra parte un buen sistema de almacenamiento de energía mediante baterías aumentaría el número de horas de uso anual y al mismo tiempo se encargaría de suavizar el desajuste entre la generación y la demanda.

Finalmente, debido al mal tiempo que se puede presentar en un determinado intervalo de tiempo tal que el sistema no pueda abastecer la demanda se incorporará un generador diésel de respaldo, el cual debe mantener cierta estabilidad en el sistema en horas pico o en arranques autógenos² a pesar del impacto ambiental que este pueda ocasionar.

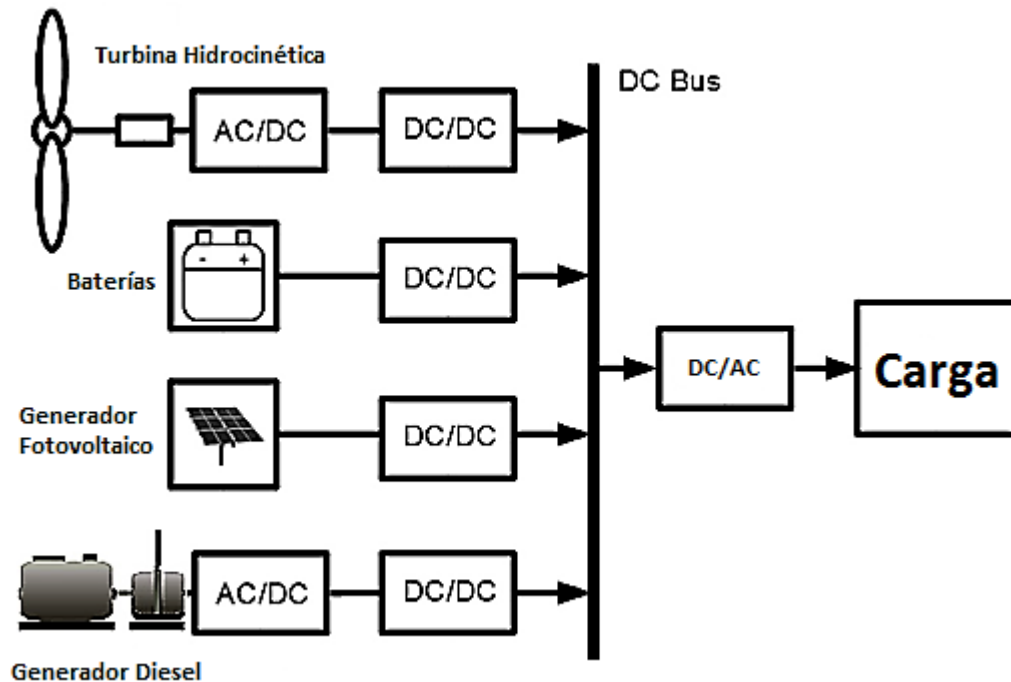


Figura 26: Configuración del sistema Híbrido

Fuente: Elaboración propia

4.2. Modelo matemático del sistema

Todas las fuentes de energía y el sistema de almacenamiento se conectan a una barra de corriente continua mediante convertidores para optimizar el control, para posteriormente a través de un inversor proveer de corriente alterna a las cargas en las viviendas.

² Un arranque autógeno es el proceso de restauración de una central eléctrica para el funcionamiento sin depender de la red externa de transmisión de energía eléctrica.

Fuente: [Wikipedia.org/arranque autógeno](https://es.wikipedia.org/wiki/Arranque_aut%C3%B3geno)

En la referencia [58] se menciona que en el análisis de prefactibilidad debe incluir el estudio de las condiciones climáticas del sitio propuesto, la disponibilidad de fuentes de energía renovables y la evaluación de su carga potencial y demanda de carga del sitio de aplicación.

El estudio de prefactibilidad ayuda a encontrar la mejor ubicación para desarrollar un sistema híbrido de energía solar renovable, en el presente estudio se ha referenciado estudios existentes en zonas aledañas a Nuevo Rocafuerte, se menciona la existencia de instalaciones fotovoltaicas en más de una docena de sitios en la Amazonía ecuatoriana, asimismo también cabe recalcar la existencia de la central hidroeléctrica más potente del país sobre en la misma zona, por lo que resulta de un lugar idóneo para instalar un sistema híbrido solar-hidroeléctrico.

4.2.1. Modelo matemático del Grupo Electrónico

El grupo electrónico diésel funciona de forma asincrónica y la potencia de la tensión variable / frecuencia variable se acondiciona con un inversor estático para proporcionar una potencia de 60 Hz.

El modelo matemático del motor diésel se lo ha realizado de tal manera que mediante operaciones matemáticas se ha llegado a obtener una expresión en la que se da una descripción de la tasa de consumo de combustible en función de la velocidad del eje y de la potencia mecánica a la salida en bornes del motor [59].

El motor diésel es modelado generalmente por un modelo simple mediante ecuaciones de primer orden que relaciona el consumo de combustible (posición del estante del combustible) con la energía mecánica del motor. La eficiencia de la combustión ε es la relación de la potencia efectiva desarrollada por el motor y disponible en su cigüeñal y el calor consumido durante el mismo tiempo, es decir:

$$\varepsilon = \frac{zW_i v}{\dot{m}_f HHV} \quad (1)$$

Donde HHV en (kJ / kg) es el mayor valor de calentamiento del combustible de entrada al motor, $\dot{m}_f$ (kg / s) es la tasa de quema de combustible, v es el ciclo que cumple el pistón por segundo, W_i (kJ) es el trabajo efectivo medio (desarrollado por un pistón durante un ciclo de combustión) y z es el número de cilindros (que funcionan durante un ciclo de combustión) [60].

La principal razón de pérdida de eficiencia de un sistema diésel se da cuando existe una quema incompleta de combustible. La presión efectiva media p_i (Pa) del motor se define como: [60].

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad (2)$$

Donde V_h (m³) es el volumen del cilindro del motor.

Obsérvese que para el funcionamiento normal o estable del sistema de potencia v es casi constante y su valor se impone para mantener la frecuencia del sistema constante a 50/60 Hz. Las pérdidas mecánicas se expresan como caída de presión equivalente (Pa). Esta presión media de las pérdidas mecánicas p_l se toma en una primera aproximación proporcional a la velocidad media del pistón U_d . La presión efectiva media real p_k del motor debe ser: [60].

$$p_k = p_i - p_l \quad (3)$$

La potencia mecánica real P_f del motor diésel viene dada por la siguiente ecuación: [59].

$$P_f = zV_h v p_k = V_H v p_k = V_H \frac{\omega_m}{\pi K} P_k \quad (4)$$

Donde K es el número de golpes del pistón, V_H (m^3) es el volumen del cilindro del motor y ω_m (rad / s) es la velocidad del motor diésel.

El par mecánico T_f ($N \cdot m$) del motor es dado entonces por la siguiente relación en la p.u. sistema:

$$T_f = \frac{P_f}{\omega_m T_b} = \frac{V_{HP_k}}{\pi K T_b} \quad (5)$$

Donde T_b ($N \cdot m$) es el par de base.

La función de transferencia de un motor alternativo implica un tiempo muerto pequeño pero significativo t_1 . Este tiempo representa un tiempo muerto efectivo que transcurre después de una perturbación, antes de que todos los cilindros del motor se disparen a un nuevo nivel de par. Los dos tiempos muertos individuales que afectan al valor de t_1 son el retardo de encendido y el retardo de carrera. Una expresión se da en [61, 62] para calcular t_1 con respecto a las variaciones de velocidad del motor diésel [60].

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_B(t - \tau_1) \quad (6)$$

Donde $\dot{m}_B$ (kg / s) es la tasa de consumo de combustible del motor diésel.

Los generadores diésel son motores diésel normales acoplados al generador. Para funcionar eficientemente, la mayoría de las DG están diseñadas de tal manera que siempre funcionan entre el 80 y el 100% de su capacidad de kW mientras suministran la carga.

La energía generada (EDG) por un DG con potencia nominal (PDG) se expresa como:

$$E_{DG} = P_f \cdot n_{DG} \cdot t \quad (7)$$

La permutación del generador con respecto a las condiciones ambientales presentes determina el despacho del grupo electrógeno. En el presente trabajo se emplea una estrategia de seguimiento de potencia, el generador diésel esta encendido cuando turbina de río + generador fotovoltaico –carga –batería, en términos de potencia se encuentra dentro de los límites superior e inferior de la función con lo cual el sistema no es capaz de satisfacer la carga. El generador diésel se apaga cuando supera el nivel superior de la función. En esta estrategia, el generador diésel se enciende sólo cuando sea necesario y esto en términos económico de uso de los generadores diésel y del costo de combustible. El generador diésel produce energía suficiente para satisfacer la demanda de carga en caso de emergencia, mientras tanto la batería se carga por los generadores renovables [60].

4.2.2. Sistema hidrocínético

La energía hidroeléctrica es la fuente de energía renovable más grande y barata del mundo. También es la forma más eficiente de producir electricidad. Aproximadamente el 18% de la electricidad mundial se suministra a partir de la energía hidroeléctrica. La previsibilidad, la regularidad y las fuentes de difusión en todo el mundo hacen de la energía hidroeléctrica una de las opciones más atractivas de la producción de energía [63].

La tecnología hidrocínética tiene varios inconvenientes comparados con los otros métodos de producción de energía. Estos sistemas tienen una producción de energía de escala relativamente pequeña con coeficientes de potencia más bajos. La máxima eficiencia que una turbina hidrocínética en flujo puede alcanzar es 59.3%, que también se conoce como límite de Betz. Sólo los sistemas profesionales de alta calidad pueden alcanzar un 50% de eficiencia. Por otro lado, la cavitación es una de las mayores limitaciones de las turbinas hidrocínéticas.

Se define como la formación de burbujas de agua o vacíos cuando la presión local cae por debajo de la presión de vapor [63].

La cavitación puede dañar significativamente la turbina. Especialmente alta velocidad partes móviles se pueden someter a la cavitación. El ambiente marino agresivo es otra desventaja de los sistemas hidrocínéticos. Especialmente los dispositivos de conversión de energía de las olas deben estar fuertemente diseñados para soportar cargas altas e irregulares. Por otro lado, los sistemas hidrocínéticos pueden tener riesgos ambientales a pequeña escala [63].

La instalación de sistemas hidrocínéticos puede bloquear la navegación y la pesca. Las partes de la turbina, los agentes químicos, el ruido y las vibraciones pueden afectar gravemente el hábitat del agua. Estos pequeños daños ambientales de los sistemas hidrocínéticos siguen siendo investigados por científicos en todo el mundo [63].

Se han realizado estudios limitados sobre las características hidrodinámicas de las turbinas hidrocínéticas. Estos sistemas todavía están en su infancia y necesitan mayor investigación. El trasfondo científico de los sistemas de conversión de energía in-stream es muy similar al de las tecnologías de conversión de energía eólica. Los principales principios como la utilización de las secciones de palas, la teoría de BEM, el límite de Betz, etc. se aprenden de las aplicaciones aerodinámicas e hidrodinámicas, las turbinas eólicas y las metodologías de propulsión de buques, aparte de una serie de diferencias fundamentales. El diseño de sistemas hidrocínéticos requiere un estudio interdisciplinario de ramas ambientales, hidráulicas, hidrológicas, eléctricas y mecánicas [63].

Se puede obtener una cantidad considerable de potencia a partir de una turbina hidrocinética (in-stream) comparada con la turbina eólica de tamaño igual. Una turbina hidrocinética que opera con una velocidad nominal de 2-3 m/s puede producir cuatro veces la energía de una turbina eólica similarmente calificada. Las densidades de fluido aproximadas son de 1000 kg/m³ y 1,223 kg/m³ para el agua y el viento, respectivamente. Las turbinas eólicas se diseñan generalmente para funcionar a la velocidad nominal del viento de 11-13 m/s. Por el contrario, la velocidad nominal de las turbinas hidrocinéticas está entre 1,5 y 3 m / s [63].

La densidad de potencia de una turbina hidrocinética que opera con una velocidad de flujo libre de 2 m/s es la misma que la de una turbina eólica con una velocidad de flujo de aproximadamente 16 m / s [63].

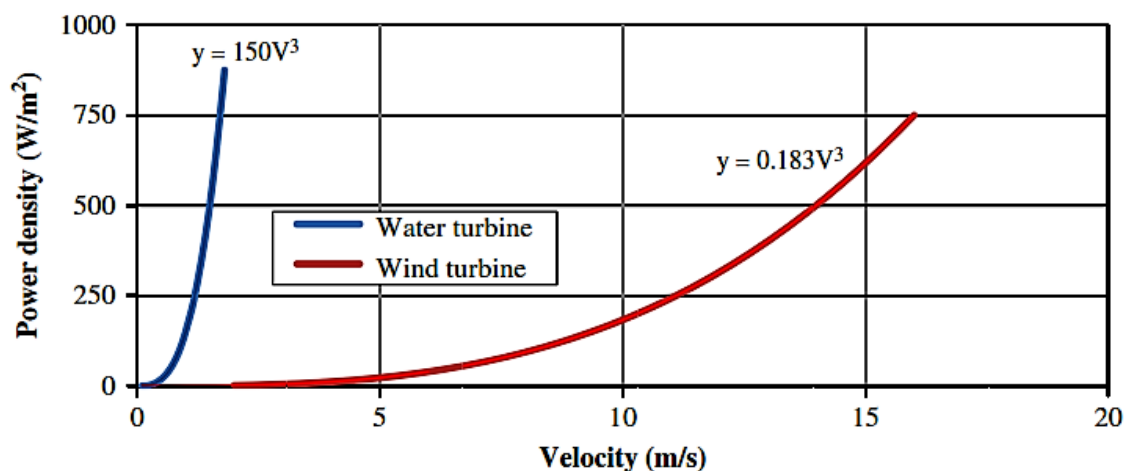


Figura 27: Comparación entre una turbina hidrocinética y una turbina eólica

Fuente: [63].

En este estudio, el sistema hidrocinético se ha seleccionado en lugar de la tradicional micro-hidroeléctrica. Su principio de funcionamiento es idéntico al del aerogenerador. Sabiendo que el agua es aproximadamente 800 veces más denso que el aire, esto significa que la cantidad de energía producida por una turbina hidrocinética es mucho mayor que la producida por una turbina eólica de igual diámetro bajo igual velocidad

del agua y del viento. Las otras ventajas del sistema hidrocínético son que el recurso de agua no fluctúa impredecible en un período muy corto de tiempo como la velocidad del viento, y el flujo de agua no cambia de dirección como el viento [64].

La energía generada (EHKT) por el sistema hidrocínético se expresa como:

$$EHKT = \frac{1}{2} \times \rho W \times A \times v^3 \times C_p, H \times \eta_{HKT} \times t \quad (8)$$

Donde ρW es la densidad del agua (kg / m³), C_p, H es el coeficiente de rendimiento de la turbina hidrocínética, η_{HKT} es la eficiencia combinada de la turbina hidrocínética y el generador, A es el área de la turbina (m²), v es el Velocidad de la corriente de agua (m / s), y t es el tiempo (s) [65].

Utilizando la ley de potencia se puede representar las ecuaciones que caracterizan a las velocidades del río en canales abiertos como es el caso en estudio, por tanto:

En el flujo de canal abierto, la velocidad en un cierto punto con respecto al lecho del río puede expresarse como una forma de función de potencia usando la relación de profundidad del mismo. Por lo tanto, la ley de poder se puede expresar como sigue [65].

$$\frac{u}{u_a} = \left(\frac{y}{a}\right)^{1/m} \quad (9)$$

Donde u es la velocidad media del tiempo en la corriente, y es la distancia ascendente del lecho normal del río. U_a es la velocidad en el punto a donde se desvía verticalmente desde el fondo del río. $1/m$ es exponente de la ley de potencia [65].

La velocidad vertical del fluido con respecto a la orilla se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{y_o}\right) \quad (10)$$

Donde, k es constante de von Karman, que es aproximadamente 0,41. Conocida la velocidad del río según de las leyes antes mencionadas se aplica a una turbina de río, los resultados pueden variar dependiendo de las condiciones del agua del río referencia de la densidad del agua función de los parámetros anteriormente mencionados [65].

Se ha representado una función matemática en la cual se pueda representar las variables más representativas del sistema, entre velocidades de río, área de la pala de la turbina, eficiencia de los diferentes componentes de la misma, potencia, velocidad del río, entre otras, en [65] se menciona un estudio en el cual se investiga el ángulo pitch óptimo según las características del recurso hidráulico en el sitio.

4.2.3. Modelo matemático del Generador Fotovoltaico

Para poder dimensionar un sistema fotovoltaico es indispensable contar con un registro de Irradiancia al menos de un año de la zona en estudio, tal y como se indicó en apartados interiores es viable la instalación de un sistema fotovoltaico ya que en los alrededores existen proyectos fotovoltaicos que se encuentran en funcionamiento en la actualidad.

En caso de no contar con medidas de radiación del lugar existen modelos desarrollados mediante software para estimar la radiación mediante diversos parámetros como: latitud, longitud, inclinación, humedad, temperatura, etc como ya se había mencionado en capítulos anteriores, la potencia de salida del generador fotovoltaico es una función de la radiación solar incidente sobre el y se expresa de la siguiente manera:

$$P_{GFV} = P_{GFV,PR} \cdot d_r \cdot G \quad (11)$$

Donde P_{GFV} se expresa en (W) y es la potencia de salida del generador fotovoltaico una vez dimensionado el mismo. G (kW/m^2) es la radiación incidente sobre el generador y d_r es el factor de escala que tenga en cuenta la reducción de potencia a la salida en condiciones de funcionamiento reales con respecto a condiciones ideales de funcionamiento nominal, que dependerá de la eficiencia de los componentes del sistema [66].

Una vez determinada la potencia total del sistema se deberá dimensionar la cantidad de módulos en serie y en paralelo que se instalaran asimismo el tipo de modulo a usarse, al ser un sistema fotovoltaico autónomo instalado en condiciones con una temperatura y humedad considerablemente altas, se debe elegir un seguidor de potencia con algoritmo MPPT o con regulador PWM dependiendo del estudio que se realice.

4.2.4. Modelo matemático del sistema de almacenamiento

La batería está representada por el modelo como se indica en la referencia [67]. En este modelo, la batería está representada por una fuente de tensión interna (E) en serie con una resistencia interna (R_0). Se supone que la resistencia interna es constante y el voltaje interno varía con el estado de carga. Entonces, el voltaje terminal (V) viene dado por la ecuación.

$$V = E - R_0 \times I \quad (12)$$

La salida del sistema compuesto por (PV + HKT) y la demanda a una determinada hora determinan el nivel de carga o descarga del banco de baterías, en caso que el sistema no sea capaz de suplir la demanda y el estado de carga de la batería sea alto, entonces se procede a alimentar desde la batería por el tiempo de autonomía

en el cual este diseñado, por lo general 5 días, en caso de no tener las condiciones ambientales necesarias para abastecer la carga se procederá a alimentar la misma desde el grupo electrógeno.

4.3. Simulación del Sistema

4.3.1. Introducción

Se ha utilizado el software Matlab con su herramienta Simulink para simular el comportamiento del sistema híbrido, mediante Simulink Design Optimization (SDO).

Con Simulink Design Optimization, se puede ajustar los parámetros del modelo Simulink para satisfacer los requisitos de dominio de tiempo, requisitos de dominio de frecuencia o ambos simultáneamente. Mediante la herramienta de optimización de diseño en Optimización de diseño de Simulink, se puede agregar y modificar los requisitos de diseño gráficamente o introduciendo datos tabulares. La herramienta gráfica también permite supervisar el progreso de la optimización. Muestra gráficas para cada requisito, así como el estado de optimización en una sola vista. Al igual que con la estimación de parámetros, puede optimizar simultáneamente varios parámetros del modelo, incluyendo escalares, vectores, matrices o campos de variables estructuradas definidas en el espacio de trabajo del modelo MATLAB o Simulink o en un diccionario de datos de Simulink.

También se puede elegir entre una variedad de algoritmos de optimización, como el descenso de gradientes, los mínimos cuadrados no lineales, la búsqueda simplex y, con Global Optimization Toolbox, la búsqueda de patrones. Para mejorar el rendimiento, puede modificar ajustes de algoritmo de optimización, como tolerancias de convergencia y número de iteraciones. Utilizando la herramienta Análisis de sensibilidad, se puede explorar su espacio de diseño utilizando técnicas como las

simulaciones de Monte Carlo y elegir las pruebas iniciales para el proceso de optimización.

Para acelerar el proceso realizando la optimización en varios núcleos o procesadores, se puede utilizar la Caja de herramientas de cálculo paralelo con la optimización de diseño de Simulink. La función de reinicio rápido de Simulink permite mejorar el rendimiento, especialmente en modelos grandes y complejos, compilando el modelo sólo una vez y utilizando esta versión para todas las simulaciones posteriores [68].

4.3.2. Algoritmo de búsqueda de patrones (Pattern search algorithm)

La técnica de optimización de búsqueda de patrones (PS) es un algoritmo evolutivo libre de derivado adecuado para resolver una variedad de problemas de optimización que se encuentran fuera del alcance de los métodos de optimización estándar. Es simple en concepto, fácil de implementar y computacionalmente eficiente. Posee un operador flexible y bien equilibrado para mejorar y adaptar la búsqueda global y afinar la búsqueda local. PS algoritmo calcula una secuencia de puntos que pueden o no acercarse al punto óptimo. El algoritmo comienza con un conjunto de puntos denominados malla, alrededor de los puntos iniciales. Los puntos iniciales o puntos actuales son proporcionados por la FA. La malla se crea agregando el punto actual a un múltiplo escalar de un conjunto de vectores llamado patrón. Si un punto en la malla tiene un mejor valor de función objetivo, se convierte en el punto actual en la siguiente iteración [69].

La búsqueda de patrones comienza en el punto inicial X_0 que se da como punto de partida por el algoritmo. En la primera iteración, con un escalar = 1 llamado tamaño de malla, los vectores patrón o vectores de dirección se construyen como $[0 \ 1]$, $[1 \ 0]$,

$[-1 \ 0]$ y $[0 \ -1]$. Los vectores de dirección se añaden al punto inicial X_0 para calcular los puntos de malla como $X_0 + [0 \ 1]$, $X_0 + [1 \ 0]$, $X_0 + [-1 \ 0]$ y $X_0 + [0 \ -1]$ como se muestra en la Fig. 28.

El algoritmo calcula la función objetivo en los puntos de malla en el mismo orden. El algoritmo examina los puntos de malla calculando sus valores objetivos de función hasta encontrar uno cuyo valor sea menor que el valor de función objetivo de X_0 . Entonces se dice que el proceso tiene éxito cuando el valor objetivo de la función disminuye en algún punto de malla y el algoritmo establece este punto igual a X_1 .

Después de un sondeo exitoso, el algoritmo pasa a la iteración 2 y multiplica el tamaño de malla actual por 2. A medida que se incrementa el tamaño de malla multiplicando por un factor ecuador 2, esto se denomina factor de expansión. Así, en la segunda iteración, los puntos de malla son: $X_1 + 2 * [0 \ 1]$, $X_1 + 2 * [1 \ 0]$, $X_1 + 2 * [-1 \ 0]$ y $X_1 + 2 * [0 \ -1]$ Se repite hasta que se cumplan los criterios de parada. Ahora bien, si en una iteración particular, ninguno de los puntos de malla tiene un valor de función objetivo menor que el valor en el punto inicial / actual en esa iteración, se dice que el proceso no tiene éxito y se utiliza el mismo punto actual en la siguiente iteración. Además, en la siguiente iteración, el algoritmo multiplica el tamaño de malla actual por 0,5, un factor de contracción, de manera que el tamaño de malla en la siguiente iteración es menor y el proceso se repite hasta que se cumplen los criterios de parada.

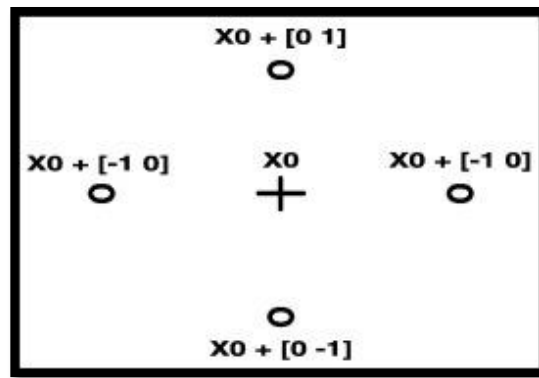


Figura 28: Patrón de búsqueda de puntos de malla

Fuente: [69].

4.3.3. Método de Optimización

En primer lugar, se deciden los parámetros del modelo a optimizar. Esta primera tarea, o etapa, se llama "Variables de Diseño". En esta tarea, los parámetros a optimizar se denominan parámetros sintonizados y el resto de parámetros del modelo se denominan parámetros definidos. En nuestro modelo, la potencia nominal de grupo electrógeno, generador fotovoltaico y la capacidad de las baterías se seleccionan como parámetros sintonizados. La potencia nominal de la turbina hidrocinética se considera como parámetro definido [70].

Para cada parámetro sintonizado, es necesario definir los valores mínimo y máximo en el proceso de optimización, así como el valor inicial. Una elección correcta de estos límites por parte del diseñador conducirá a un proceso de optimizaciones más exitosas. Los resultados obtenidos por el modelo matemático realizado anteriormente así como los resultados de parámetros ambientales como recurso de cada fuente se utilizaron como referencias para establecer los valores iniciales (semillas) y los rangos de variación de los parámetros. La segunda tarea en el flujo de trabajo de optimización es definir la señal del modelo a tener en cuenta en el proceso de optimización y sus restricciones [70].

En el proceso de optimización, SDO busca los valores apropiados de los parámetros sintonizados para que la señal seleccionada no supere los límites. Esta tarea se denomina "Requisitos de diseño", como ya se había mencionado anteriormente el equilibrio entre generación y carga siempre debe estar dentro de los límites inferior y superior de la función objetivo con lo cual el sistema no es capaz de satisfacer la carga por lo que el generador diesel estará encendido, caso contrario apagado [70].

Finalmente, la última tarea es la selección de los métodos de optimización y búsqueda. Esta tarea se denomina "Opciones de optimización". SDO ofrece al usuario la posibilidad de elegir entre tres tipos de métodos de optimización: Gradient Descent; Búsqueda de patrones y métodos de búsqueda simple. Para cada método, se puede seleccionar un algoritmo entre varios [70].

Al probar varios casos, se concluyó que el método de búsqueda de patrones era el único método que permitía encontrar valores apropiados para los parámetros sintonizados. Se realizaron varias pruebas con el fin de analizar cada uno de los algoritmos disponibles para el método de búsqueda de patrones, y se concluyó que tanto Latyn Hypercube (M2-LH) y Algoritmo Genético (M2-GA) dieron resultados satisfactorios cuando se aplicaron al sistema híbrido Bajo estudio, y por lo tanto, fueron los algoritmos utilizados. En este paso, se deben definir cuatro parámetros de optimización para controlar el proceso de optimización [70].

Tolerancia de parámetros: El proceso de optimización termina cuando los valores sucesivos de los parámetros cambian menos que este número.

Tolerancia de restricción: Este parámetro representa la cantidad relativa máxima por la cual se pueden violar las restricciones y todavía permiten una convergencia exitosa.

Tolerancia de función: Este parámetro se utiliza para finalizar la optimización cuando valores de función sucesivos son inferiores a este valor. Este parámetro sólo es útil cuando se selecciona el método de búsqueda Simplex. Su valor no importa en nuestro estudio.

Máximas iteraciones: Definir el número máximo de iteraciones permitidas en el proceso de optimización.

Una vez realizadas las tres tareas anteriores, SDO puede iniciar el proceso de optimización. Éste es el último paso en el flujo de trabajo de optimización. SDO convierte automáticamente los requisitos definidos en la tarea dos en un problema de optimización restringida y luego resuelve el problema mediante la técnica de optimización seleccionada en el paso tres con las funciones de optimización en las casillas de herramientas de optimización y optimización global de MATLAB [70].

El problema de optimización restringida simula iterativamente el modelo Simulink del sistema híbrido, compara la evolución de la diferencia entre la generación, la carga de la batería y el consumo con las restricciones y utiliza los métodos de optimización para ajustar los parámetros sintonizados para satisfacer mejor las restricciones. El proceso de optimización se repite iterativamente hasta que se satisfagan los parámetros de control definidos en la tarea tres.

Una vez que el proceso de optimización ha finalizado, se dan los parámetros de la señal de operación del sistema fotovoltaico y del hidrocínético, así como el nivel de carga de la batería en el modelo Simulink. La optimización realizada con el software SDO es una optimización técnica, por lo que no se tienen en cuenta los aspectos económicos, en contraposición a la optimización tecno-económica se lo realiza por HOMER y HOGA [70].

Optimización del sistema híbrido mediante el software HOMER.

Descripción de software HOMER

El software HOMER como ya se había indicado brevemente en secciones anteriores es una potente herramienta de diseño y planificación de Sistemas Híbridos de Energía Renovable (HRES) para determinar el tamaño óptimo de sus componentes a través de la realización del análisis tecnoeconómico. Muchos de los recursos como WT, fotovoltaica, células de combustible, energía hidroeléctrica pequeña, biomasa, convertidores, baterías y generadores convencionales se modelan en HOMER.

HOMER también considera HRES en modos conectado a la red y autónomo. En la fig. 29 se muestra la configuración típica de HRES diseñada en HOMER. Los datos de entrada requeridos para la simulación con HOMER y también un marco comprensivo para mostrar cómo los tamaños óptimos del equipo de HRES son determinados por HOMER se describen en esta sección [71].

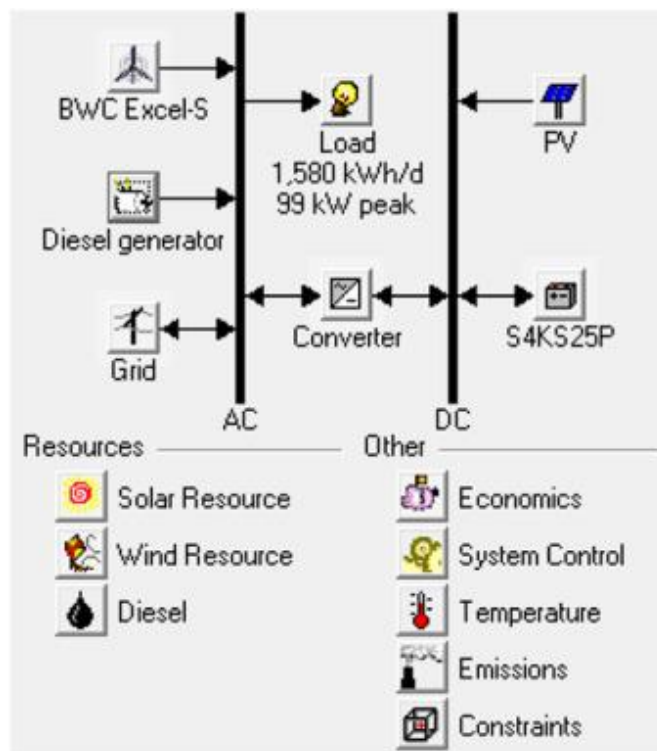


Figura 29: Esquema típico de una microrred en HOMER.

Datos de entrada

HOMER requiere seis tipos de datos para simulación y optimización, incluyendo datos meteorológicos, perfil de carga, características del equipo, espacio de búsqueda, datos económicos y técnicos, los mismos se pueden ingresar manualmente o importar [71].

Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos son la velocidad del viento, la radiación solar, la temperatura y el caudal que se introducen en el software en forma de promedios mensuales o datos de series temporales. HOMER utiliza estos datos de entrada para calcular la potencia de salida de WT, energía fotovoltaica y energía hidroeléctrica [71].

Cargar perfil

El perfil de carga de cada región es el factor más importante en la simulación y optimización. Algunos lugares como universidades, hospitales, hoteles y ciudades industriales tienen datos de consumo de carga real, que son apropiados para la simulación. Estos datos reales se introducen en HOMER como datos de series de tiempo. Sin embargo, en algunas regiones especialmente remotas y rurales donde los datos de consumo de carga real no están disponibles, el perfil de carga debe ser previsto con aviso a la especificación de esa región. Estos datos se introducen en HOMER como perfil diario y HOMER los utiliza en la restricción de equilibrio de potencia [71].

Características del equipo

De acuerdo con las características de cada equipo, que es modelado en HOMER, el funcionamiento eficiente de la misma en HRES se determina. Las características del equipo de HRES se describen en [71].

Espacio de búsqueda

Dado que los componentes de HRES, incluyendo WT, matriz fotovoltaica, generador, batería y convertidor tienen diferentes tamaños incluyendo energía hidrocinética, hay un espacio de búsqueda que se considera en la simulación y la optimización. Así, el espacio de búsqueda incluye $5 \times 5 \times 5 \times 3 = 375$ planes (combinación de diferentes equipos) de que se realizarán las etapas de simulación y optimización para cada uno de ellos [71].

4.3.4. Análisis del modelo del sistema

En primer lugar se presenta el cuadro de cargas indicando el consumo de energía diario medio mensual, como se presentó en la tabla 3 la potencia instalada en cada vivienda es de 65 W en promedio, ya que la población de Nuevo Rocafuerte es de aproximadamente mil habitantes, tomando en promedio una familia de 3 miembros, la potencia instalada total bordearía los 20 kW.

Utilizando la curva de carga presentada en la fig. 19 se puede obtener la curva de carga del lugar en estudio, realizando el producto de la potencia instalada por el valor en por unidad presentado, se puede observar que la demanda pico se presenta entre las 19:00 y 20:00 para una carga residencial.

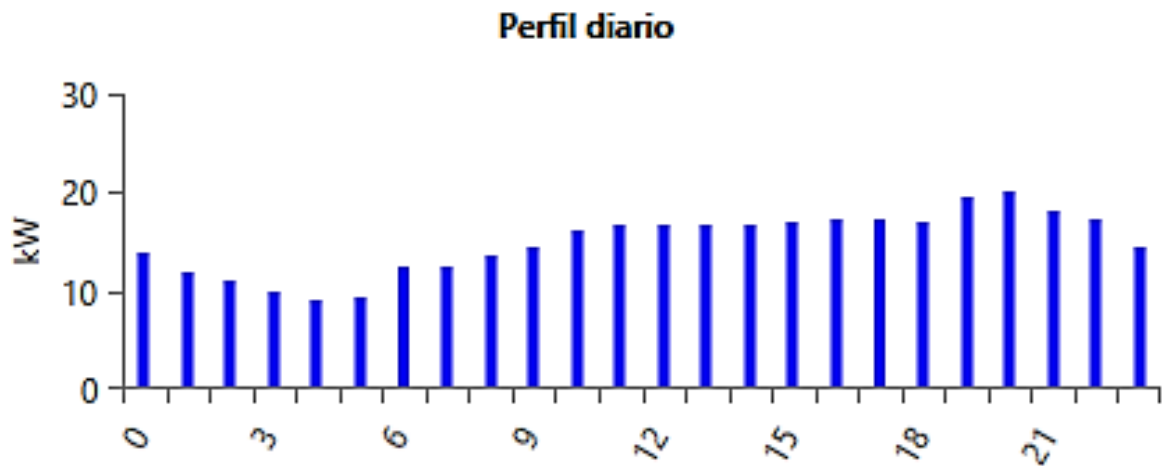


Figura 30: Perfil de carga diario en Nuevo Rocafuerte

La potencia máxima de 20 kW se produce a las 20:00, el valor mínimo se da alrededor de las 4:00 am y es de aproximadamente 10 kW, con respecto al perfil estacional no existen variaciones considerables ya que en la zona el clima es constante todo el año.

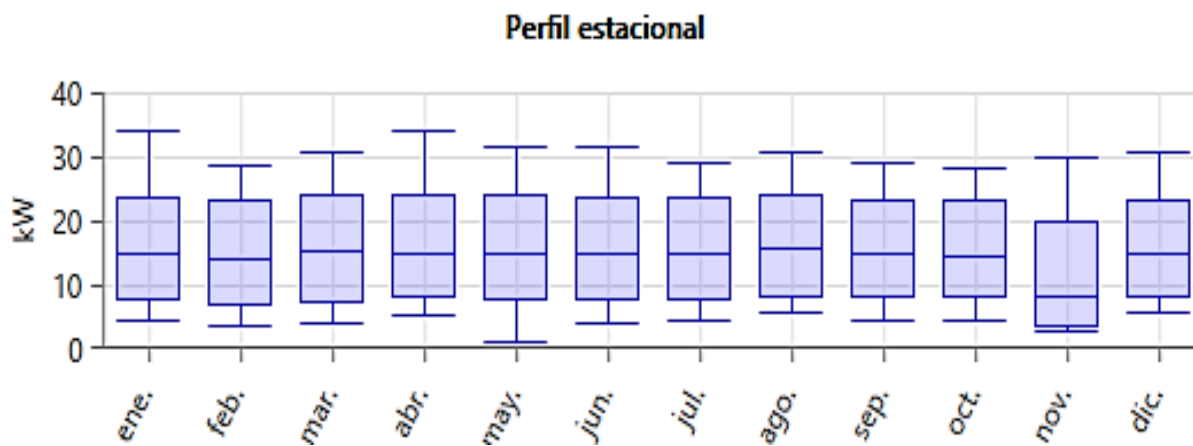


Figura 31: Perfil de carga estacional en Nuevo Rocafuerte

Los perfiles fueron creados en el software HOMER partiendo de datos reales de la zona, para modelar el sistema es de gran utilidad utilizar intervalos de 1 hora durante un año, además se utilizó el mismo software para obtener Irradiancia y velocidad de río.

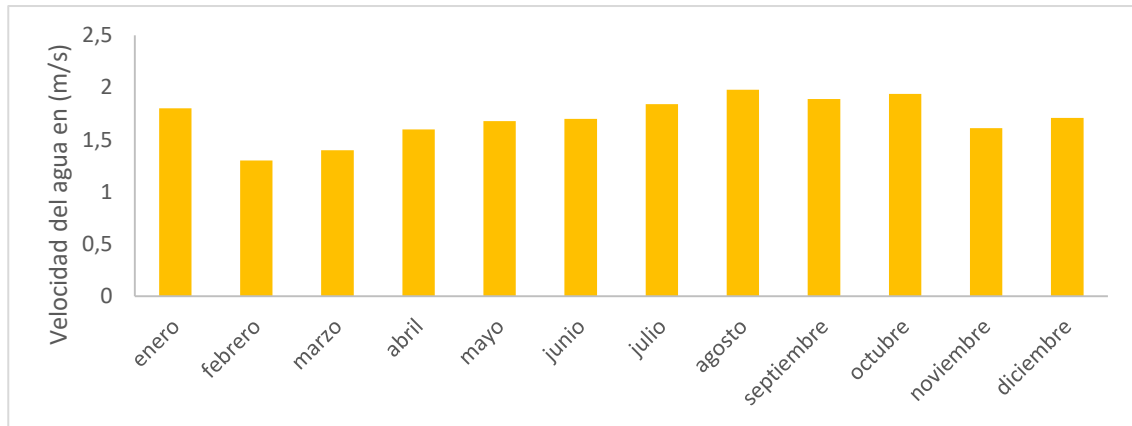


Figura 32: Velocidad del río

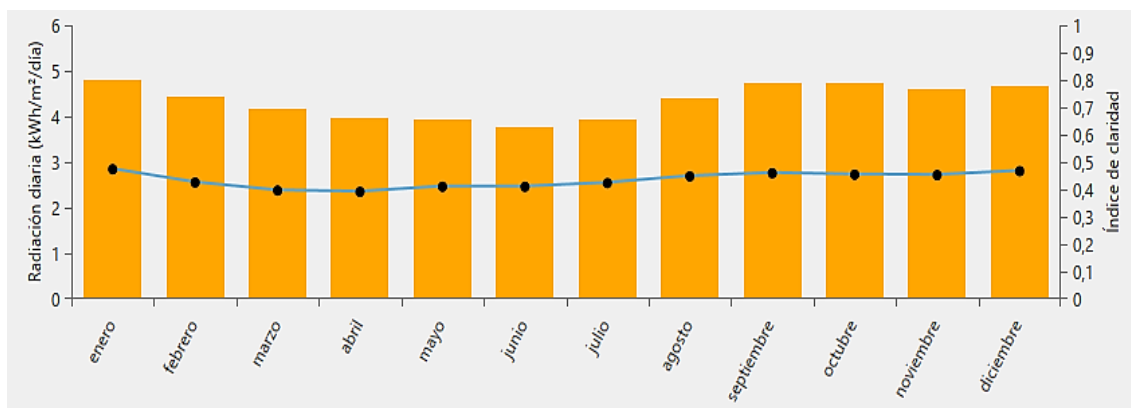


Figura 33: Gráfico de Irradiación media mensual

En primer lugar se realiza el modelado del sistema utilizando la herramienta Simulink, en la cual cada elemento del sistema es representado mediante ecuaciones matemáticas que representan cada parámetro que interviene con respecto a la producción de energía eléctrica, este modelado mediante una interfaz gráfica se representa en la fig. 35, como parámetros a sintonizar se definen la potencia de los paneles, el número de baterías y de la turbina hidrocínética, la potencia del generador diesel se define como una variable definida y no sintonizada, asimismo se ajustan los parámetros de la manera que el sistema no supere ciertos valores definidos. Cuando el sistema alcanza un nivel de batería por debajo de cero se enciende el generador diesel $PV + HKT - P_{bat} - P_{load}$.

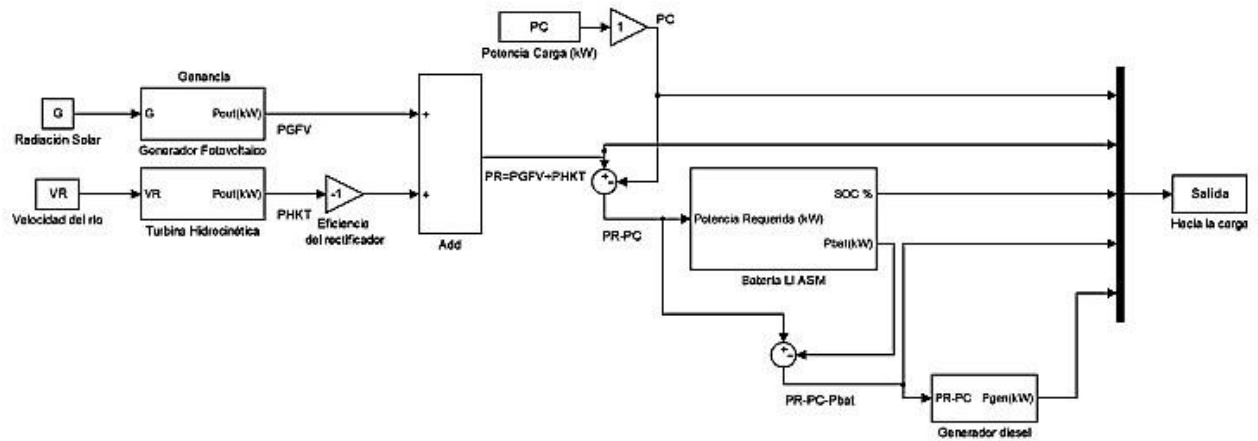


Figura 34: Sistema híbrido modelado en Simulink

En segundo lugar se utiliza el software HOMER para comprobar los resultados obtenidos con Simulink Design Optimization realizados anteriormente, además de eso se trata de una herramienta potente que es ampliamente utilizado para optimizar sistemas híbridos de energía renovable en este caso es capaz de realizar la modelación del sistema en estudio, mediante un control en DC de los generadores y el sistema de acumulación se puede establecer un punto óptimo para posteriormente transformar a corriente AC mediante un inversor, además este software es capaz de analizar aspectos económicos del sistema, el diseño se muestra en la fig. 35.

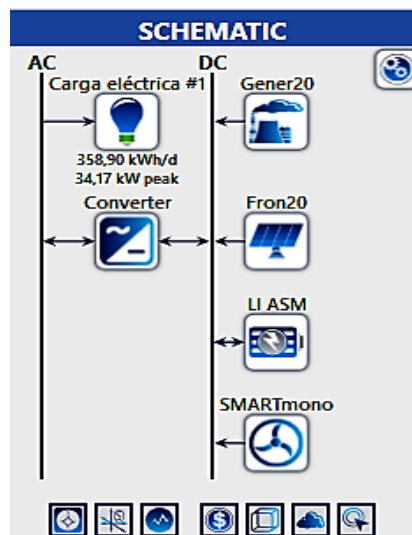


Figura 35: Diseño del sistema en el software HOMER

5. CAPÍTULO V RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos por la simulación en el software Simulink Design Optimization y el software HOMER, ya que el lugar de estudio Nuevo Rocafuerte está alejado de zonas urbanas es fundamental minimizar el uso anual del generador diesel, el resultado en Simulink presenta tres métodos de optimización, Genetic Algorithm, Latin Hypercube y Nelder Mead los cuales presentan resultados similares, se hace una comparación entre un sistema fotovoltaico sin seguidor de máxima potencia y uno con seguidor MPPT.

El resultado muestra que si se usa un algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia el número de paneles a instalar se reduce, el punto óptimo indica 25 kW de instalación fotovoltaica, 20 kW en cuanto a una turbina hidrocínética, en base se menciona una turbina estándar de 5kW de potencia pero para evitar pérdidas en conexión serie en la simulación se ha utilizado una turbina de 20 kW, la capacidad de la batería resulta alrededor de 400 kWh lo cual en condiciones ideales resulta aproximadamente en 20 días de autonomía del sistema, el generador diesel y el inversor son variables fijas ya que se optimiza el número de horas de funcionamiento del grupo electrógeno mediante el algoritmo Latin Hypercube.

Por otro lado en la fig. 36 se presentan los resultados de la simulación utilizando el software HOMER el cual presenta la potencia óptima de cada elemento del sistema con conexión en una barra de corriente continua para posteriormente transformar a alterna mediante un inversor.

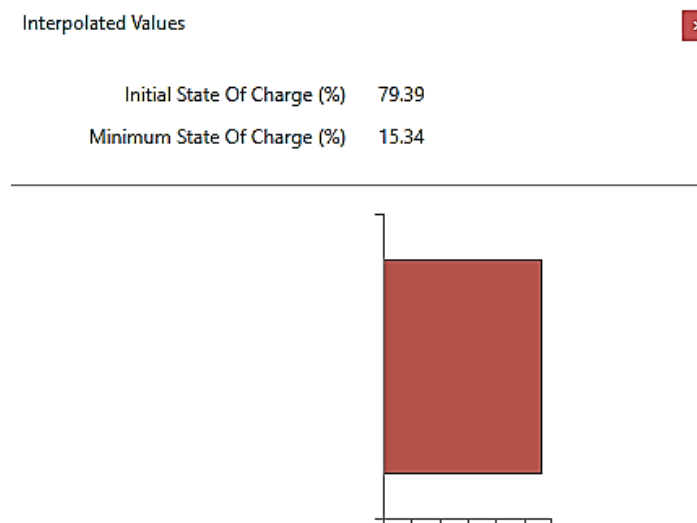
Las baterías empleadas son de plomo ácido ya que son las más calificadas para este tipo de sistema en cuanto coste y tiempo de vida útil.

Architecture											
					Fron20 (kW)	Fron20-MPPT (kW)	Gener20 (kW)	LI ASM	P154-20	Ideal30kW (kW)	Dispatch
					31,4	25,0	20,0	30	1	30,0	CC
							20,0	46	1	30,0	CC

Figura 36: Resultados de la simulación en el software HOMER**Tabla 7:** Resultados de la simulación

Elemento	Simulink Design Optimization			Homer
	Genetic algorithm	Latin hypercube	Nelder - Mead	
PV power (kW)	32,8	32,05	32	31,4
PV power (kW) - MPPT	26,08	25	25	25
HKT power (kW)	20,5	20,3	20,1	20
Batteries capacity (kWh)	400	410	390	380
Number of Batteries	35	36	34	30
Diesel generator (kW)	20	20	20	20
Inversor (kW)	30	30	30	30

El estado de carga de las baterías (SOC) en promedio es del 50%, y el estado de carga mínimo anual (SOC) es del 15,34% con un SOC inicial del 79,39%.

**Figura 37:** Estado de Carga del banco de baterías diseñado en (HOMER)

Uno de los aspectos más importantes de este estudio es disminuir el tiempo de operación anual del generador diesel ya que el lugar donde de estudio se encuentra en una zona protegida de la amazonia ecuatoriana, mediante HOMER se puede estimar las horas de operación del generador diesel, durante el año a operado por 2314 horas.

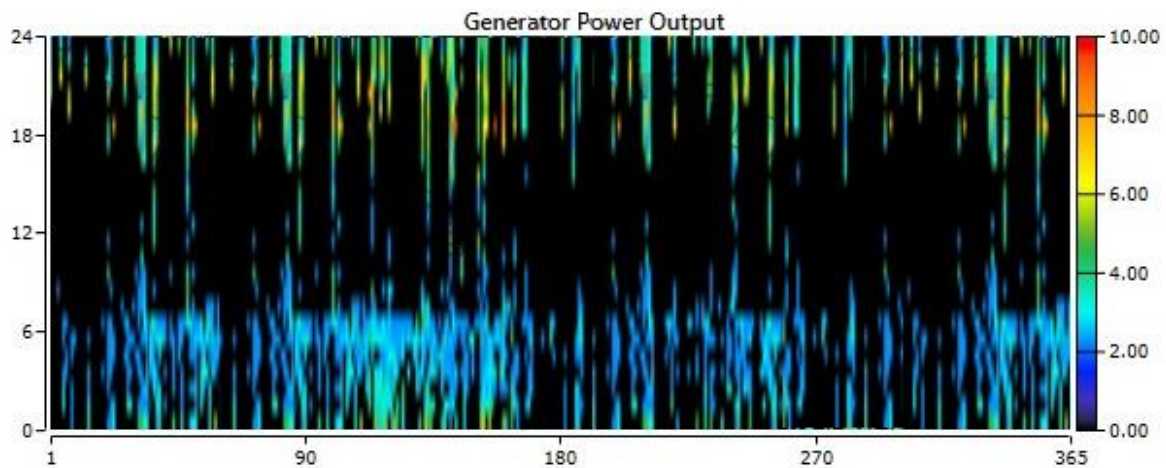


Figura 38: Tiempo anual de operación del generador diesel

Mediante el algoritmo Latin Hypercube a partir de Simulink Design Optimization (SDO) la energía anual producida por el generador diesel es de 37680 kWh/año. Los resultados son presentados en la siguiente figura.

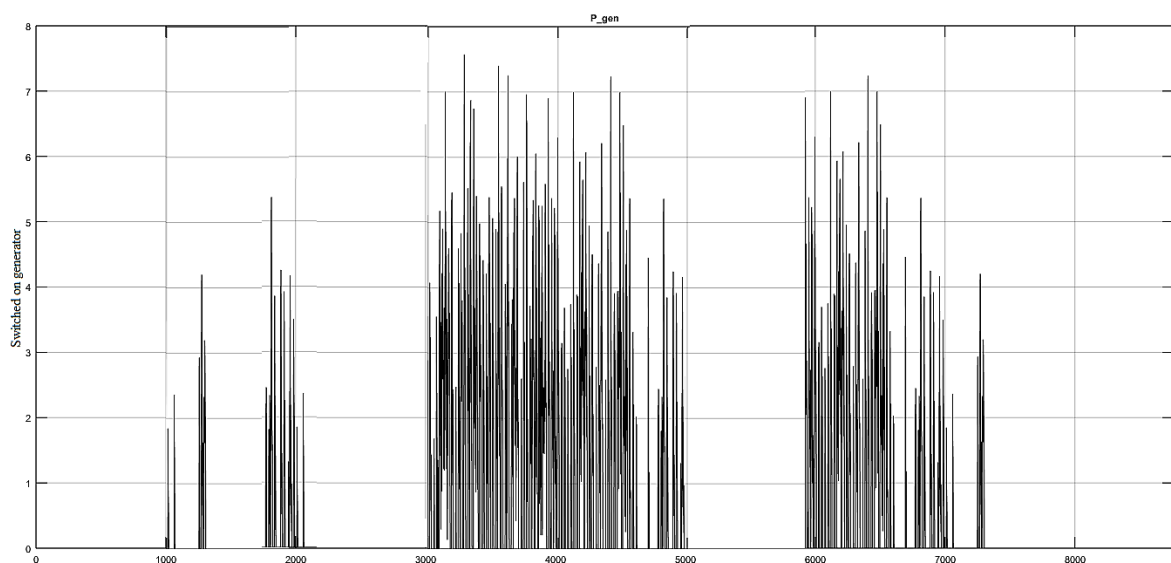


Figura 39: Accionamiento horario del generador diesel

6. CONCLUSIONES

La operación de un sistema energético depende principalmente del correcto dimensionamiento de los componentes que lo conforman, dependiendo de las variables de entrada que tenga cada uno de ellos se podría llegar a un dimensionamiento óptimo del mismo si se aplican algoritmos adecuados para llegar a esa solución.

Si el sistema energético está compuesto por energías renovables es ambientalmente viable con respecto a un sistema convencional, se ha demostrado que un sistema compuesto por más de un tipo de energía renovable resulta tener una mayor viabilidad que el compuesto por una sola ya que es capaz de complementar la producción de energía eléctrica interconectando dos tipos de generadores que dependen de diferente recurso energético renovable.

La optimización de un sistema híbrido no es una tarea fácil ya que depende de muchas variables aleatorias en el tiempo e impredecibles, en el presente estudio se realizó la optimización de un sistema híbrido compuesto por un generador fotovoltaico y una turbina hidrocínética como fuentes de energía renovable, como respaldo se utilizó un generador diesel y un sistema de almacenamiento con baterías de plomo ácido, en primer lugar se presentó un modelado matemático del sistema demostrando la posibilidad de encontrar el punto óptimo mediante ecuaciones, en segundo lugar se realizó la simulación en Matlab Simulink en el cual se obtuvo los paneles solares y la capacidad de la batería más grandes que en la simulación en HOMER, la diferencia en cantidades es mínima, asimismo las horas de funcionamiento del generador diesel son similares en ambos casos, por ende se concluye que los dos métodos son válidos

7. REFERENCIAS

- [1] M.S. Güney, K. Kaygusuz Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9) (2010), pp. 2996–3004
- [2] VERMAAK, H.J., KUSAKANA, K. and KOKO, S.P., 2014. Status of Micro Hydrokinetic River Technology in Rural Applications: A Review of Literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1, vol. 29, pp. 625-633.
- [3] Hoq Tanbhir, U.A. Nawshad, N. Islam, Ibnea Sina, K. Syfullah, Rahman Raiyan Micro hydro power: promising solution for off-grid renewable energy source *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2 (12) (2011).
- [4] Zhou H. Maximum power point tracking control of hydrokinetic turbine and low-speed high-thrust permanent magnet generator design [MSc thesis]. Missouri University of Science and Technology; 2012.
- [5] Maniaci D.C., Ye Li. Investigating the influence of the added mass effect to marine hydrokinetic horizontal-axis turbines using a general dynamic wake wind turbine code. *Oceans' 11 conference*, 19–21 September 2011, Hawaii, USA.
- [6] Hermann S. Design of a micro-hydro powered battery charging system for rural village electrification [Master's thesis]. Carl von Ossietzky University Oldenburg: Postgraduate Programme Renewable Energy; 2006.
- [7] K. Kusakana, H.J. Vermaak Hydrokinetic power generation for rural electricity supply: case of South Africa *Renewable Energy*, 55 (2013), pp. 467–473
- [8] S.E. Ben Elghali, R. Balme, K. Le Saux, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier, F. Hauville A simulation model for the evaluation of the electrical power potential harnessed by a marine current turbine in the Raz de Sein *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32 (4) (2007), pp. 786–797 CrossRef
- [9] Bryans AG. Impacts of tidal stream devices on electrical power systems [Ph.D. thesis]. The Queen's University of Belfast: Faculty of Engineering and Physical Science; 2006.
- [10] M. Anyi, B. Kirke Hydrokinetic turbine blades: design and local construction techniques for remote communities *Energy for Sustainable Development*, 15 (3) (2011), pp. 223–230

- [11] Epler J. Tidal resources characterization from acoustic doppler current profilers [M.Sc. thesis]. University of Washington: Department of Mechanical Engineering; 2010.
- [12] Previsic M, Polagye B. Deployment effects of marine renewable energy technologies—tidal energy scenarios, Report ID: RE Vision DE-002, University of Washington, June 2010.
- [13] Gauntlett D. Resource assessment and feasibility study for use of hydrokinetic turbines in the tailwaters of the Priest Rapids Project [M.Sc. thesis]. University of Washington: Department of Mechanical Engineering; 2011.
- [14] Lalander E. Modelling hydrokinetic energy resources for in-stream energy converters (thesis). Department of Engineering Sciences, Uppsala University; 2010.
- [15] Briand M, Ng K. Kinetic energy recovery turbine technology: resource assessment and site development strategy. World Energy Conference, Issue 2.1: Energy resources and technologies, today and tomorrow, 13–17 September 2010.
- [16] P. Duvoy, H. Toniolo HYDROKAL: a module for in-stream hydrokinetic resource assessment Computer & Geosciences, 39 (2012), pp. 171–181
- [17] M.J. Khan, G. Bhuyan, M.T. Iqbal, J.E. Quancoe Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review Applied Energy, 86 (10) (2009), pp. 1823–1835
- [18] M.J. Khan, M.T. Iqbal, J.E. Quancoe River current energy conversion systems: progress, prospects and challenges Renewable and Sustainable Energy Reviews,
- [19] Hydrovolts. “In-stream Hydrokinetic Turbines”. Powertech Labs, 2006
- [20] Kari Sornes. “Small-scale water current turbines for river applications”. Zero Emission Resource Organization, January 2010.
- [21] K. Golecha, T.I. Eldho, S.V. Prabhu Study on the interaction between two hydrokinetic Savonius turbines International Journal of Rotating Machinery, 2012 (2012) (Article ID 581658)
- [22] Osa Amilibia J.L., Iturregi Aio A. Selection of the electrical generator for a wave energy converter. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada, Spain, 23–25 March 2010.

- [23] Scherer L.G., de Camargo R.F.. Control of micro hydro power stations using nonlinear model of hydraulic turbine applied on microgrid systems. In: Power Electronics Conference, Brazilian, 2011. p. 812–818.
- [24] B.A. Singh, S.B. Singh, M. Singh, R. Dixit, N. Mittal, A. Baranwal Stand Aloe power generation by 3ø asynchronous generator: a comprehensive survey International Journal of Reviews in Computing, 10 (2012), pp. 36–51
- [25] K. Thomas, M. Grabbe, K. Yuen, M. Leijon A low speed generator for the energy conversion from marine currents—experimental validation of a simulation. Proceedings of the IMechE Part A: Journal of Power and Energy, 222 (1) (2009)
- [26] Vu Van T, Driesen J, Belmans R, Leuven KU. Small generation sources and micro-grid option for rural electrification process.. In: CIGRE Study Committee C6 on Distribution System and Dispersed Generation Colloquium on Electricity for Rural Socio-Economic Development Conference, Langkawi Island, Malaysia, 1–5 May 2007.
- [27] Kusakana K, Vermaak H. Feasibility study of hydrokinetic power for energy access in rural South Africa. In: Proceedings of the IASTED Asian Conference, Power and Energy Systems, 2–4 April 2012.p. 433–438.
- [28] Kunaifi K. Options for the Electrification of Rural Villages in the Province of Riau, Indonesia [M.Sc. dissertation]. Perth Australia: School of Engineering and Energy, Murdoch University; 2009.
- [29] K. Golecha, T.I. Eldho, S.V. Prabhu Influence of the deflector plate on the performance of a modified Savonius water turbine Applied Energy, 88 (9) (2011), pp. 3207–3217
- [30] Golecha K., Eldho T.I., Prabhu S.V. Investigation on the performance of a modified Savonius water turbine with single and two deflector plates. The 11th Asian International Conference on Fluid Machinery and the 3rd Fluid Power Technology Exhibition, Chennai, India, 21–23 November 2011.
- [31] K. Golecha, T.I. Eldho, S.V. Prabhu Performance study of modified Savonius water turbine with two deflector plates International Journal of Rotating Machinery, 2012 (2012) (Article ID 679247)
- [32]. Juan Carlos Lata, Christopher Reyes, Francisco Jurado, Luis. M. Fernández-Ramírez, Sizing optimization of a small hydro/photovoltaic hybrid system for electricity generation in Santay Island, Ecuador by two methods

- [33]. Planning and Installing Photovoltaic Systems. A guide for installers, architects and engineers 2nd edition. The German Energy Society. Ed: Earthscan 2008. ISBN-13: 978-1-84407-442-6
- [34]. Generación eléctrica mediante un sistema híbrido hidráulico-fotovoltaico aislado de la red para una pequeña población rural - Autor: Daniel Visiga Delgado Barcelona - España
- [35]. IEEE Guide for Array and Battery Sizing in Stand-Alone Photovoltaic (PV) Systems. IEEE Standards Coordinating Committee 21. IEEE Std 1562™-2007.
- [36]. LUNA-RUBIO, R., TREJO-PEREA, M., VARGAS-VÁZQUEZ, D. and RÍOS-MORENO, G.J., 2012. Optimal Sizing of Renewable Hybrids Energy Systems: A Review of Methodologies. Solar Energy, 4, vol. 86, no. 4, pp. 1077-1088.
- [37]. Protogeropoulos, C., Brinkworth, B.J., Marshall, R., 1997. Sizing and techno - economical optimization for hybrid solar PV–wind power systems with battery storage. International Journal of Energy Research 21 (6), 465–479.
- [38]. Celik, A.N., 2003. Techno-economic analysis of autonomous PV–wind hybrid systems using different sizing methods. Energy Conversion and Management 44 (12), 1951–1968.
- [39]. Connolly, D. et al., 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. Applied Energy 87 (4), 1059–1082.
- [40] Ashok, S., 2007. Optimised model for community-based hybrid energy system. Renewable Energy 32 (7), 1155–1164.
- [41] Rao, S.S., 1996. A text book on Engineering optimization, theory and practice, third ed. Wiley, New York.
- [42] Kaldellis, J.K., Zafirakis, D., Kondili, E., 2009. Optimum autonomous stand-alone photovoltaic system design on the basis of energy payback analysis. Energy 34 (9), 1187–1198.
- [43] Dufo-Lo´pez, R., Bernal-Agustín, J.L., 2005. Design and control strategies of PV–diésel systems using genetic algorithms. Solar Energy 79 (1), 33–46.
- [44] Yang, H. et al., 2008. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm. Solar Energy 82 (4), 354–367.
- [45] Yang, H., Zhou, W., Lou, C., 2009. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system. Applied Energy 86 (2), 163–169.

- [46] Yang, H.X., Lu, L., Burnett, J., 2003. Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic-wind power generation systems in Hong Kong. *Renewable Energy* 28 (11), 1813–1824.
- [47] Yang, H., Lu, L., Zhou, W., 2007. A novel optimization sizing model for hybrid solar–wind power generation system. *Solar Energy* 81 (1), 76–84.
- [48] Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization. In: *Proc. Int. Conf. Neural Netw.*, pp. 1942–1948.
- [49] Hakimi, S.M., Moghaddas-Tafreshi, S.M., 2009. Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran. *Renewable Energy* 34 (7), 1855–1862.
- [50] Ekren, B.Y., Ekren, O., 2009. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy* 86 (9), 1387–1394.
- [51] Bernal-Agustín, J.L., Rodolfo, Dufo-Lo´pez., Rivas-Ascaso, D., 2006. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. *Renewable Energy* 31 (14), 2227–2244.
- [52] Katsigiannis, Y.A., Georgilakis, P.S., Karapidakis, E.S., 2010. Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power system with renewables. *IET Renewable Power Generation* 4 (5), 404–419.
- [53] Shi, J.-H., Zhu, X.-J., Cao, G.-Y., 2007. Design and techno-economical optimization for stand-alone hybrid power systems with multi-objective evolutionary algorithms. *International Journal of Energy Research* 31 (3), 315–328.
- [54] McCulloch, W.S., Pitts, 1943. A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (4), 115–133.
- [55] Hoppfield, J.J., 1982. Neural networks and to physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 79 (8), 2554–2558.

- [56] Pérez, Carlos y Fernanda Solíz (2014). “Territorio, resistencia y criminalización de la protesta”. En La restauración conservadora del correísmo, pp. 153-166, Juan Cuvi, editor. Quito: Arcoiris Producción Gráfica.
- [57] Villalba, Unai (2013). “Buen vivir vs development: A paradigm shift in the Andes?”. Third World Quarterly, No. 34, Vol. 8, pp. 1427-1442.
- [58] Visiones de la electrificación rural en la Amazonía ecuatoriana disputando lógicas hegemónicas María Ten Palomares y Alejandra Boni Aristizabal : 29 de marzo de 2016.
- [58] KHARE, V., NEMA, S.and BAREDAR, P., 2016. Solar–wind Hybrid Renewable Energy System: A Review. , May 2016.
- [59] G.S Stavrakakis, G.N Kariniotakis A general simulation algorithm for the accurate assessment of isolated diésel–wind turbine systems integration. Part I: a general multimachine power system model IEEE Trans Energy Conversion, 10 (3) (1995), pp. 577-583
- [60] JURADO, F. and SAENZ, J.R., 2002. Neuro-Fuzzy Control for Autonomous wind–diésel Systems using Biomass. , September 2002.
- [61] Roy S, Malik OP, Hope GS. An adaptive control scheme for speed control of diésel driven powerplants. IEEE Trans Energy Conversion 1991;6(4):605–11.
- [62] Roy S, Malik OP, Hope GS. Adaptive control of speed and equivalence ratio dynamics of a diésel driven power-plant. IEEE Trans Energy Conversion 1993;8(1):13–9.
- [63] YUCE, M.I. and MURATOGLU, A., 2015. Hydrokinetic Energy Conversion Systems: A Technology Status Review. , March 2015
- [64] KUSAKANA, K., 2014. Techno-Economic Analysis of Off-Grid Hydrokinetic-Based Hybrid Energy Systems for onshore/remote Area in South Africa. , 15 April 2014
- [65] H.-E. Lee, C. Lee, Y.-J. Kim, J.-S. Kim, and W. Kim, “Power Law Exponents for Vertical Velocity Distributions in Natural Rivers,” Engineering, vol. 5, no. 12, pp. 933–942, 2013.
- [66] MOHANTY, S., PATRA, P.K.and SAHOO, S.S., 2016. Prediction and Application of Solar Radiation with Soft Computing Over Traditional and Conventional Approach – A Comprehensive Review. , April 2016
- [67] J. F. Manwell and J. G. McGowan, “Lead acid battery storage model for hybrid energy systems,” Sol. Energy, vol. 50, no. 5, pp. 399–405, May 1993.

- [68] “Simulink Design Optimization Documentation - MathWorks España.” [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/sldo/>. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [69] SAHU, R.K., PANDA, S.and PADHAN, S., 2015. A Hybrid Firefly Algorithm and Pattern Search Technique for Automatic Generation Control of Multi Area Power Systems. , January 2015
- [70] CANO, A., et al., 2014. Optimal Sizing of Stand-Alone Hybrid Systems Based on PV/WT/FC by using several Methodologies. , November 2014
- [71] BAHRAMARA, S., MOGHADDAM, M.P.and HAGHIFAM, M.R., 2016. Optimal Planning of Hybrid Renewable Energy Systems using HOMER: A Review. , September 2016, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301496> ISBN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.039>.