

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
ESCUELA DE POSGRADO**

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**MAESTRIA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE
SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA**



**“VIABILIDAD DEL USO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS EN ZONAS RURALES
AISLADAS DE ALTA DENSIDAD”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE SISTEMAS DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

**AUTORES : Bach. RODRIGO LUCIO CUEVA DIAZ
Bach. JORGE VILLAFUERTE FUERTE**

Two handwritten signatures in black ink. The top signature is for Rodrigo Lucio Cueva Diaz and the bottom signature is for Jorge Villafuerte Fuerte.

A large, stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Jorge Villafuerte Fuerte.

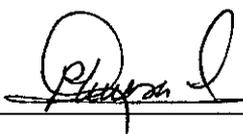
**Callao, 2018
PERÚ**

ANEXO A : CONSENTIMIENTO INFORMADO

Nosotros, Rodrigo Lucio Cueva Diaz y Jorge Villafuerte Fuerte, damos fe de que nuestra tesis titulada "VIABILIDAD DEL USO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS EN ZONAS RURALES AISLADAS DE ALTA DENSIDAD" es de nuestra autoría y su aplicación de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica para las zonas rurales aisladas de alta densidad puede ser significativa y de vital importancia para resolver los problemas energéticos de nuestro país a nivel de generación y de preservación de las condiciones apropiadas del medio ambiente.

Finalmente, facultamos a que la información contenida en nuestra tesis pueda ser utilizada por otro(s) investigador(es) haciendo la respectiva referencia.

Dando fe de lo declarado, firmamos.



Rodrigo Lucio Cueva Diaz



Jorge Villafuerte Fuerte

Callao, 28 de Julio del 2018

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO

MIEMBROS DEL JURADO

Dr.	: FERNANDO JOSÉ OYANGUREN RAMÍREZ	PRESIDENTE
Mg.	: HUGO FLORENCIO LLACZA ROBLES	SECRETARIO
Mg..	: JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ	MIEMBRO
Dr.	: NICANOR RAÚL BENITES SARAVIA	MIEMBRO
Mg.	: ALVARO HUMBERTO VELARDE ZEVALLOS	ASESOR

Nº DE LIBRO : 01

FOLIO : 069

FECHA DE APROBACIÓN : mayo 08, 2018

RESOLUCIÓN DIRECTORAL : 046-2018-CDUPFIEE

DEDICATORIA

A nuestros padres, hijos y esposas por su comprensión y por habernos alentado siempre para que perseveremos en la realización de nuestros objetivos y metas trazadas.

Los autores

AGRADECIMIENTO

A nuestros profesores y a todas las personas que nos facilitaron el poder concluir con éxito nuestros estudios de Maestría.

A nuestro asesor, que ha tenido la voluntad e interés para guiarnos en esta investigación.

A nuestra Alma Mater y la Escuela de Posgrado de la FIEE - UNAC por habernos apoyado y permitido concluir con nuestra Tesis.

Agradecer la oportunidad a CARELEC por habernos permitido realizar nuestros estudios de Maestría y por las becas obtenidas.

Los autores

ÍNDICE

• RESUMEN	09
• ABSTRACT	10
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.1 Identificación del problema	11
1.2 Formulación del problema	16
1.3 Objetivos de la investigación (general y específicos)	20
1.4 Justificación	21
II. MARCO TEÓRICO	23
2.1 Energía Solar	24
2.2 Constante Solar Extraterrestre	25
2.3 Irradiancia Espectral	26
2.4 Radiación solar debajo de la atmosfera	28
2.5 Efecto Fotoeléctrico	30
2.6 Semiconductores, niveles y bandas de energía	31
2.7 Semiconductores tipo "p" y "n"	33
2.8 Célula Fotovoltaica	34
2.9 Parámetros de funcionamiento de una célula fotovoltaica	35
2.10 Tipos de Células fotovoltaicas	44
2.11 Componentes de una instalación fotovoltaica	49
2.12 Sistema Fotovoltaico autónomo	53
2.13 Sistema fotovoltaico conectado a una red	54
2.14 Energía generada	55
2.15 Definiciones de Términos Básicos	56
2.16 Abreviaturas utilizadas	58
III. VARIABLES E HIPOTESIS	59
3.1 Definición de las variables	59
3.2 Operacionalización de variables	59
3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas	60

IV. METODOLOGÍA	61
4.1 Tipo de investigación	61
4.2 Diseño de investigación	81
V. RESULTADOS	94
5.1 Resultados parciales	94
5.2 Resultados finales	95
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
6.1 Contrastación de Hipótesis con los resultados	96
6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares	97
VII. CONCLUSIONES	98
VIII. RECOMENDACIONES	99
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	103
Anexo N° 1: Costos de Sistemas Fotovoltaicos	104
Anexo N° 2: Factores de Planta de sistemas Fotovoltaicos	109
Anexo N° 3: Niveles de radiación diaria – promedio anual de principales ciudades del Perú	111
Anexo N° 4: Sistemas Aislados con Generación Térmica en le Perú Manejados por las Municipalidades	116
Anexo N° 5: Matriz de Consistencia	119

Relación de Cuadros

Cuadro N° 2.1 : Energía Solar Potencial Solar Fotovoltaica en el Perú	25
Cuadro N° 2.2 : Características de las Baterías Solares.	51
Cuadro N° 4.1 : Evolución de la Potencia Instalada fotovoltaica en MWp	64
Cuadro N° 4.2 : Proyectos Adjudicados en las tres Subastas RER – Perú	69
Cuadro N° 4.3 : Consumo de energía eléctrica de ordenadores y sistemas de comunicación	84
Cuadro N° 4.4 : Datos del Proyecto Piloto para evaluación de un sistema fotovoltaico	85
Cuadro N° 4.5 : Pérdidas en porcentaje (%) por distintos conceptos para una instalación fotovoltaica	87
Cuadro N° 4.6 : Características de Paneles Fotovoltaicos- cuadro comparativo	88
Cuadro N° 4.7 : Factores de Planta Anual de Centrales Fotovoltaicas	92
Cuadro N° 5.1 : Costos de generación de la energía eléctrica en SFV hasta 100 kWp en US\$/Kwh para diferentes montos de inversión	94
Cuadro N° 5.2 : Costos de la energía eléctrica del SFV para diferentes esquemas de subsidios directos a la inversión.	95

Relación de Figuras

Fig. N° 1.1 : Participación de las Tecnologías de Generación en la producción de energía eléctrica en el mercado peruano 1995-2013 (GWh)	10
Fig. N° 1.2 : Producción de Electricidad 2013 – Perú	11
Fig. N° 1.3 : Resultados de la Subastas RER	11
Fig. N° 1.4 : Cobertura de Electricidad y Pobreza – Año 2007	17
Fig. N° 1.5 : Costos unitarios de electricidad en localidades aisladas.	18
Fig. N° 2.1 : Constante Solar (G_c) en la zona exterior de la atmosfera de la tierra	25
Fig. N° 2.2 : Irradiancia espectral estándar	25
Fig. N° 2.3 : Variación de la Irradiancia solar extraterrestre	27
Fig. N° 2.4 : Radiación sobre la superficie de la tierra	28
Fig. N° 2.5 : Pérdidas en la Radiación solar	28
Fig. N° 2.6 : Dispositivo experimental para el efecto fotoeléctrico	29
Fig. N° 2.7 : Bandas de energía en diferentes materiales	31
Fig. N° 2.8 : Bandas de energía en diferentes materiales – 2	32
Fig. N° 2.9 : Semiconductores tipo “p” / “n”	33
Fig. N° 2.10 : Esquemas de Operación de una Celda Solar	34
Fig. N° 2.11 : Circuito equivalente de una celda solar	35
Fig. N° 2.12 : Característica V-I de la Celda Fotovoltaica	37
Fig. N° 2.13 : Conexión en serie de celdas FV	37
Fig. N° 2.14 : Conexión en paralelo de celdas FV	38
Fig. N° 2.15 : Variación de la masa de aire respecto a la posición del sol con respecto al CENIT	39
Fig. N° 2.16 : Variación de la densidad de potencia espectral y la irradiación con respecto a la longitud de onda del espectro solar	40
Fig. N° 2.17: Efecto de la irradiación sobre la característica V-I del generador FV	41
Fig. N° 2.18 : Variación de la característica V-I del generador FV al variar la temperatura a irradiación constante.	41
Fig. N° 2.19 : Evolución de las eficiencias de las celdas fotovoltaicas	47
Fig. N° 2.20 : Esquema Típico de un módulo fotovoltaico	48
Fig. N° 2.21 : Sistema de regulación de carga	51
Fig. N° 2.22 : Sistemas híbridos con energía renovable	53
Fig. N° 2.23 : Sistemas fotovoltaicos conectados a red	54

Fig. N° 4.1 : Evolución de la Potencia instalada de centrales FV en el mundo	61
Fig. N° 4.2 : Evolución comparativa de diferentes fuentes de generación	62
Fig. N° 4.3 : Sistemas híbridos Solar FV Diesel en la localidad Padre Cocha	67
Fig. N° 4.4 : Precios de la energía en Subastas RER – Perú	69
Fig. N° 4.5 : Costos de Instalación de Pequeños Sistemas FV menores a 100 kWp	89

RESUMEN

Este trabajo aborda la viabilidad de la implementación de los sistemas fotovoltaicos como complemento de suministro de energía eléctrica en sistemas eléctricos aislados de gran densidad con generación térmica.

En el primer capítulo se presenta una introducción de la problemática general del Sistema Interconectado Nacional del Perú (SEIN), así como de los Sistemas Aislados Térmicos que cuentan con un suministro eléctrico de poca calidad y confiabilidad debido a múltiples problemas que van desde los altos costos de generación, así como de la mala gestión técnica de estos sistemas por falta de apoyo técnico y económico que deben contar desde el Gobierno Peruano.

En el capítulo II se muestra la base teórica del funcionamiento de celdas fotovoltaicas así también como las diversas tecnologías desarrolladas en este campo y que ha permitido alcanzar mejoras técnicas y la utilización de diversos materiales en la construcción de celdas fotovoltaicas, así como se presenta un análisis técnico de las diferentes componentes de un sistema fotovoltaico.

En el capítulo III se presenta las variables de la investigación que definen las hipótesis identificadas en lo general y específico.

En el capítulo IV se presenta la metodología utilizada en la investigación analizando el grado de desarrollo de estas tecnologías en el Perú y en el Mundo, las ventajas y problemas suscitados en la implementación de las celdas fotovoltaicas para abastecer la demanda de energía eléctrica en los sistemas eléctricos.

En la parte final del trabajo (Capítulos V al VIII) se dan a conocer los resultados de la investigación realizada así como las conclusiones y recomendaciones para una implementación masiva (Generación Distribuida), como una alternativa de solución al actual esquema de suministro eléctrico en los Sistemas Eléctricos Aislados, acorde con los planes de diversificación de nuestra matriz energética planteadas por el sector de Energía y Minas y sobre todo aprovechar los niveles de radiación solar que tiene Perú respecto a otros países.

ABSTRACT

This work addresses the feasibility of the implementation of photovoltaic systems as a complement to the supply of electrical energy in isolated electrical systems with thermal generation.

In the first chapter an introduction of the general problematic of the National Interconnected System of Peru (SEIN) is presented, as well as of the Thermal Insulated Systems that have an electrical supply of poor quality and reliability due to multiple problems that go from the high costs of generation, as well as the poor technical management of these systems due to lack of technical and economic support that must be available from the Peruvian Government.

Chapter II shows the theoretical basis of the operation of photovoltaic cells-as well as the various technologies developed in this field and that has allowed to achieve technical improvements and the use of various materials in the construction of photovoltaic cells, as well as an analysis of the different components of a photovoltaic system.

Chapter III presents the research variables that define the hypotheses identified in the general and specific.

Chapter IV presents the methodology used in the research analyzing the degree of development of these technologies in Peru and the World, the advantages and problems raised in the implementation of photovoltaic cells to supply the demand for electrical energy in the systems electric

In the final part of the work, (Chapter V to VIII) the results of the research carried out as well as the recommendations for a massive implementation (Distributed Generation), as a solution alternative to the current electricity supply scheme in the Isolated Electrical Systems, according to the plans of diversification of our energy matrix proposed by the Energy and Mines sector and above all take advantage of the levels of solar radiation that Peru has compared to other countries.

I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Identificación del problema

El 85% de la demanda eléctrica en el Perú es atendida por el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) que suministra de energía eléctrica a los usuarios domésticos y comerciales de las principales ciudades, a la industria y la minería formal y cuya demanda a diciembre del 2013 era cubierta por una serie de centrales hidroeléctricas (2815 MW), térmicas (2538 MW) y algunas centrales no convencionales centrales fotovoltaicas (96 MW), centrales eólicas (232 MW) y centrales de biomasa/biogás (27 MW) de reciente construcción, en la fig. N° 1.1, 1.2 y 1.3 se aprecia el grado de participación de estas tecnologías en la cobertura de la demanda, la evolución en la participación en la cobertura de la demanda y los costos de generación de las tecnologías que utilizan Recursos Energéticos Renovables (RER) y que para el año 2013 la generación de origen hidráulico representaba un 52% y la generación de origen térmico con gas natural representaba un 46% de la producción total, siendo la generación eléctrica a base de gas natural la que ha crecido con una tasa relativamente importante pasando de un 12% de participación en el año 1995 al 46% en el año 2013, la participación de la generación RER a través de sistemas no convencionales fue significativa representando solo un 2% de la demanda total.

Fig. N° 1.1: Participación de las tecnologías de generación en la producción de energía eléctrica en el mercado eléctrico peruano, 1995-2013 (GWh).

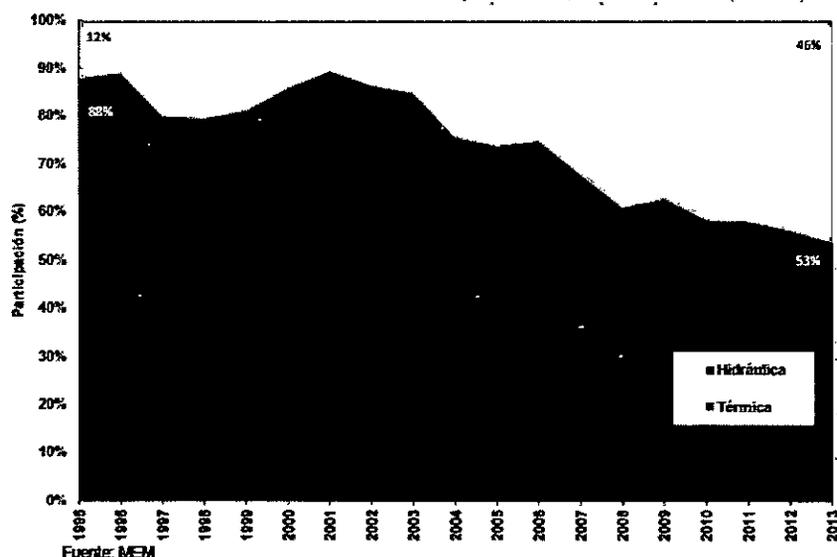
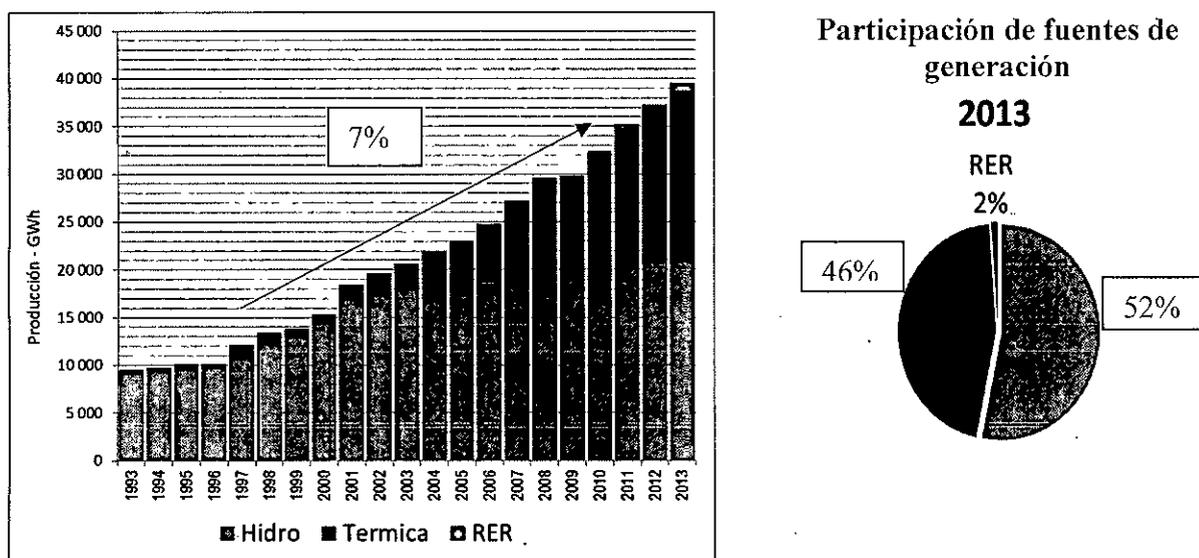


Fig. N° 1.2: Producción de electricidad 2013 - Perú



Fuente: Exposición Política Energética del Perú – Ing. Edwin Quintanilla – Nov - 2014

Fig. N° 1.3 : Resultados de subastas RER

PROYECTOS ADJUDICADOS – NUEVAS INVERSIONES RENOVABLES NO CONVENCIONALES (HIDROELÉCTRICAS MENORES A 20 MW, EÓLICAS, SOLARES, ETC.) (Primera, segunda y tercera subasta)

Proyectos adjudicados	Fecha de operación	MW	Inversión (Millones US\$)
40 Hidroeléctricas pequeñas	2012 / 2017	391	980
4 Plantas eólicas	2012 / 2015	232	720
5 Plantas solares	2012 / 2014	96	390
3 Plantas de biomasa/biogas	2011/2014	27	50
Total: 52 Proyectos		746	2140

Precios resultantes (Primera / Segunda / Tercera subasta):

- Hidroeléctricas: 60 / 53 / 56 US\$/Mwh
- Eólicas: 80 / 69 US\$/Mwh
- Solares: 221 / 120 US\$/Mwh

Fuente: Exposición Ing. Riquel Mitma – GART – Osinergmin – Nov- 2014

Esta proporción de generación de origen térmico ha excedido largamente la combinación económica que debe existir en la cobertura de la demanda del SEIN, que para algunos

expertos¹, la demanda eléctrica debe ser cubierta por un 70% de origen hidráulico y el resto el 30% puede ser cubierto por centrales térmicas convencionales con gas natural y centrales no convencionales como solares, eólicas, biomasa, geotérmicas etc., sobre todo porque nuestro país tiene un gran potencial hídrico y este debe de ser su principal fuente de generación. El estado consiente de este hecho, ha dado ciertas normas e incentivos para que se realicen inversiones a mediano y largo plazo de centrales hidroeléctricas y de centrales no convencionales que utilizan energías renovables como las Eólicas, Solares y Biogás y cuya implementación en algunos años mejorará la cobertura de la demanda del Sistema Eléctrico Interconectado (SEIN).

El estado dentro de su política energética esta incentivando el consumo de gas natural en el sector eléctrico, en el sector domestico e industrial, como por ejemplo en el sector eléctrico para cubrir la demanda de la Zona Sur del Perú, se ha licitado y adjudicado 1200 MW, que deberá utilizar el Gas Natural como combustible, con esta solución, la cobertura de la demanda eléctrica con gas natural, tendrá un porcentaje similar a la que tenemos actualmente, es bueno aclarar que las soluciones que da el gobierno está basándose en una fuente agotable y cuyo uso, en nuestra opinión, debe ser perfectamente planificada para garantizar la cobertura de la demanda futura de energía eléctrica en nuestra patria.

Si bien el gas natural es el combustible ideal para las maquinas térmicas, pero no dejan de ser contaminantes, y ellos producen cerca del 80% de CO2 comparado a los producidos por los combustibles tradicionales (Carbón, Petróleo), por lo tanto desde el punto de vista ambiental hay un problema que se debe resolver acorde con la política energética dada por el gobierno peruano.

El suministro eléctrico a nivel interconectado de las principales ciudades de nuestra patria tienen la calidad adecuada, pero esto no se cumplen en las zonas urbano rurales y rurales donde el estado ha implementado una serie de soluciones acorde con su política de expansión de la frontera eléctrica, que van desde la extensión de las redes eléctricas de los sistemas existentes, hasta plantear generación aislada con sus propias redes eléctricas, en estos sistemas por la excesiva longitud de las líneas primarias y por el tipo de sistemas (MRT en algunos casos) están sujetos a problemas técnicos y medio

¹ Entrevista al Ing. Cesar Butrón – Presidente del COES – Diario Gestión – 28 de enero del 2015

ambientales (lluvias, huaycos, rayos, etc.) que originan cortes del suministro o que caída de tensión supera largamente el porcentaje permitido, o en los sistemas de generación aislada específicamente la que corresponde a la generación térmica se presentan déficit de suministro (Suministro solo por 2 a 4 horas por día) y si a esto le agregamos la mala gestión de estos sistemas, el deterioro de las redes eléctricas, no permiten a sostenibilidad de estos sistemas, por lo tanto aquí se presentan retos que debemos superar, planteando alternativas de solución técnica y que permitan atenuar el problema presentado.

Por lo tanto, la tesis va enfocada a plantear alternativas de solución al problema general encontrado en aquellos sistemas de generación térmica aislada, que es la restricción de suministro eléctrico, debido a los altos costos de operación y mantenimiento de estos sistemas y que no permiten la auto sostenibilidad de los mismos, vía el ingreso de las tarifas eléctricas propias.

El estado debe retomar su rol planificador y promotor, de manera que de las pautas de cual debe ser el derrotero en el mediano y largo plazo para un desarrollo energético acorde con los lineamientos de seguridad energética y desarrollo sostenido en estos sistemas, situación que han entendido a la par nuestros vecinos como Chile y Ecuador que por ejemplo ya están apostando por un mayor desarrollo conjunto de proyectos de desarrollo de energías renovables no convencionales, con la finalidad de dar un complemento energético y que garanticen la seguridad energética de los sistemas eléctricos en general.

En los sistemas aislados mayores como es el caso del Sistema de Iquitos, cuya cobertura de su demanda eléctrica es 100% de origen térmico basado en la quema de petróleo, el estado ha planteado su interconexión al SEIN a través de una Línea de Transmisión desde la zona de Moyobamba – Iquitos en 220 kV, 600 km, con una inversión estimada de 581,18 millones de US\$, que a juicio de profesionales con mucha experiencia en el sector eléctrico consideran que este proyecto es demasiado costoso sobre todo porque su trazo deberá cruzar una zona agreste y con una cobertura vegetal bastante densa (Selva Virgen) y que su impacto ambiental sería bastante significativo; alternativamente se están estudiando la posibilidad de implementar centrales hidroeléctricas cercanas a la zona de Iquitos como es el proyecto de la CH Mazan de 544 MW de potencia, cuyos resultados

están siendo evaluados pero por el momento están resultando bastante caros, se estima una inversión del orden de 1207 millones de dólares americanos incluyendo su interconexión con la ciudad de Iquitos, aquí el estado por ejemplo se está olvidando plantear sistemas de generación no convencionales como centrales tipo biomasa (madera y basura) y centrales solares fotovoltaicas y/o pequeñas centrales hidroeléctricas, que si bien no van a solucionar la cobertura total de la demanda pero pueden ser un complemento al actual sistema de generación y ayudarán a reducir la quema de petróleo y la contaminación ambiental y además serán centrales eléctricas complementarias a la generación eléctrica principal que es de origen térmico.

Con respecto a la demanda de los sistemas aislados menores a lo largo de todo el Perú, la situación es más que preocupante, ya que por diversos motivos económicos y técnicos según un informe elaborado por el OSINERGMIN en el año 2010 el servicio eléctrico es bastante precario, con múltiples problemas de estado de conservación de las centrales de generación, de las redes eléctricas y del sistema de gestión, que hacen que el servicio sea no adecuado y deficiente, planteando soluciones desde la formalización de empresas prestadoras del servicio, como modificaciones a las leyes existentes para acogerse a incentivos de compensación eléctrica y económica por ser estos sistemas eléctricos demasiados onerosos respecto a la tarifa que se les cobra a los usuarios, es en esta línea que planeamos dar soluciones parciales que complementen y mejoren el suministro eléctrico en estas regiones las cuales se plantearán en capítulos siguientes.

Por lo tanto, el problema general y los problemas específicos serán planteadas con la finalidad de mejorar la calidad de vida de los pobladores de los centros poblados que tienen actualmente restricción en el suministro eléctrico y que los objetivos de la investigación debe dar soluciones viables técnicas y económicas a los siguientes problemas:

- Restricción en suministro eléctrico se traduce en una mala calidad de vida del Poblador
- Mala calidad de la energía eléctrica
- Alto costo de combustible
- Problemas de transporte de combustible (Diesel N° 2), zonas de difícil acceso
- Mala gestión de los sistemas eléctricos
- Deterioro de las instalaciones

- Tarifas altas
- Mala confiabilidad de los sistemas, si falla la generación aislada, no cuentan con fuentes alternativas que mejoren la confiabilidad del suministro
- Falta de apoyo por parte del estado en los sistemas eléctricos fuera de la zona de concesión de las empresas de distribución
- Falta de una adecuada capacitación técnica a los responsables del manejo de estos sistemas

1.2 Formulación del problema

Todavía en el Perú existen sistemas eléctricos aislados, manejados por municipalidades cuya confiabilidad del servicio en la mayoría de los casos no es la adecuada y con altos costos de generación, estos sistemas eléctricos equipados con grupos diesel tienen problemas para cubrir la demanda eléctrica, debido a múltiples razones como por ejemplo la logística para llevar el combustible, que siendo lugares alejados, a veces sin caminos de acceso, el transporte del combustible resulta excesivamente caro a estos lugares y si a esto añadimos el deterioro de las instalaciones, la mala gestión del sistema y la falta de apoyo por parte del estado dan como resultado un mal servicio eléctrico y una restricción de la misma, problema que debemos resolver utilizando nuevas alternativas de generación eléctrica que utilicen fuentes de energía limpia como la solar fotovoltaica

Lo mencionado anteriormente está corroborado en un estudio que ha elaborado la Gerencia de Fiscalización Eléctrica de Osinergmin, en su estudio Diagnóstico de la Problemática de la Electrificación en el Perú – Año 2010, en la cual las principales conclusiones que se obtuvieron transcribimos a continuación:

- *Existe gran cantidad de instalaciones de electrificación rural construidas con deficiencias técnicas y/o falta de saneamiento físico legal que no son recepcionadas por las concesionarias de distribución.*
- *En los sistemas eléctricos rurales aislados a cargo de los municipios o comités de electrificación se observa un deterioro paulatino y acortamiento de la vida útil de las instalaciones lo que origina restricciones del suministro eléctrico y en algunos casos el colapso del sistema.*
- *Se ha constatado que en la mayoría de los sistemas eléctricos rurales aislados no administrados por las empresas concesionarias, el ingreso vía venta de energía al usuario no cubre los costos mínimos de operación y mantenimiento.*
- *El FOSE y el Mecanismo de Compensación para Sistemas Aislados, solo benefician a los usuarios regulados y no a los abastecidos por sistemas a cargo de municipalidades y*

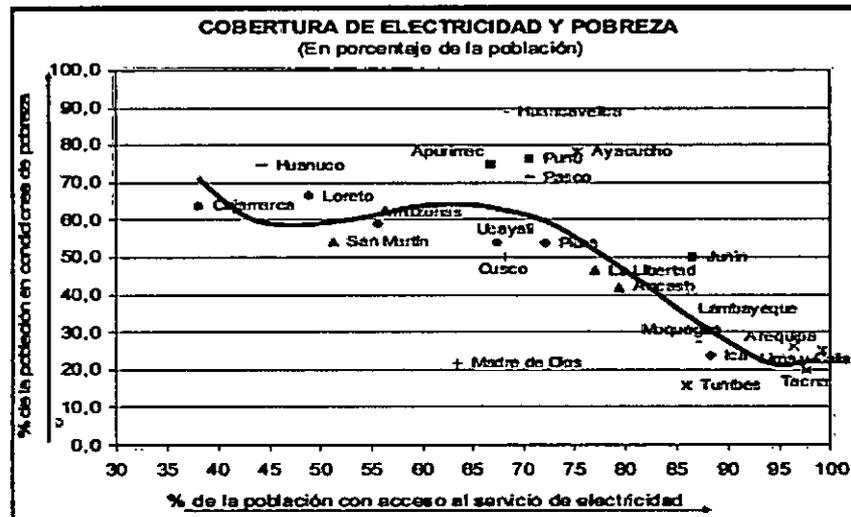
comités de electrificación, cuyos habitantes conforman sectores sociales en extrema pobreza.

- *La derogación de la Ley N° 28546 "Ley de Promoción y Utilización de Recursos Energéticos Renovables no Convencionales en Zonas Rurales, Aisladas y de Frontera del País", y la falta de implementación de otros dispositivos legales no fomentan la utilización de recursos energéticos renovables en la electrificación rural.*
- *Se constató la existencia de deficiencias en las obras de electrificación rural, donde las más relevantes son:*
 - *Estudios de ingeniería deficientes y/o incompletos que generan pérdidas y costos excesivos en la etapa operativa, por ejemplo existen sistemas con extensiones de red que en algunos casos sobrepasan los 300 km, ocasionando baja confiabilidad del suministro y excesiva caída de tensión.*
 - *En los estudios y obras de electrificación rural existe falta de coordinación de proyectistas y autoridades interesadas, con las empresas concesionarias responsables del suministro y/o operación.*
- *OSINERGMIN no puede ejercer plenamente su labor supervisora y fiscalizadora en aquellos sistemas eléctricos rurales donde existe la participación de dos o más entidades debido a que presentan indefinición de responsabilidades.*
- *Falta reglamentar el procedimiento para que los responsables de las instalaciones existentes y en actual operación puedan solicitar al MEM la calificación de SER y una concesión rural, en aplicación del Art. 20° de la LGER, que permita a su vez la mejora del servicio.*
- *La prestación del servicio eléctrico por las municipalidades es en promedio de 4 a 5 horas diarias solamente, debido al alto costo del combustible en la generación térmica y/o a ineficiencias en la operación, que aunado a la baja demanda de los sistemas rurales origina que la prestación del servicio no sea sostenible y continua en el tiempo.*

De lo mencionado se desprende claramente que existe un problema serio que debe ser resuelto o plantear alternativas que permitan mejorar las condiciones de vida del poblador a través de soluciones que puedan ser viables técnica y económicamente, la cual debe ser estudiado a fin de plantear una solución adecuada para cada caso en particular. A continuación se muestran un cuadro donde se muestra la relación directa entre el grado de electrificación y el nivel de pobreza en el Perú (año 2007), que explica la importancia de contar con el suministro de energía eléctrica entre otros aspectos para mejorar la calidad de vida del poblador.

Según información difundida por el Instituto Nacional de Estadística e Informática que en el presente año 2014 el problema de la pobreza se incrementó en 08 regiones (Pasco, Amazonas, Madre de Dios, Tumbes, San Martín, Piura, Ucayali y Tacna), en vez de reducirse.

Fig N° 1.4: Cobertura de Electricidad y Pobreza – Año 2007



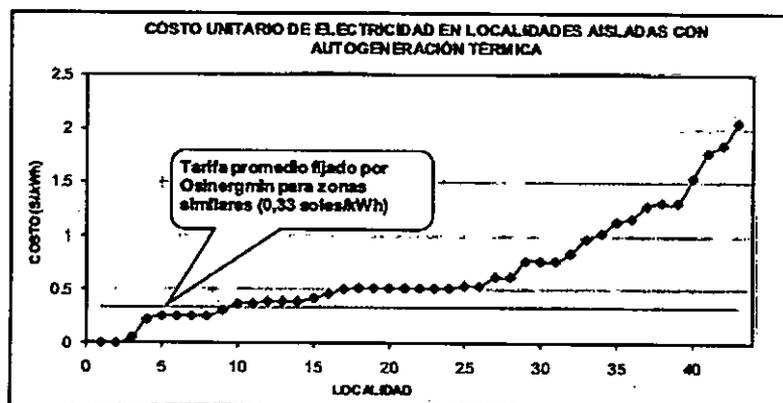
Fuente: Diagnostico de la Electrificación Rural en el Perú – Osinergmin – Año 2010

Una de las razones principales para que exista una restricción del suministro eléctrico es su alto costo de generación, debido principalmente a que el costo de combustible (DIESEL N° 2) puesto en la zona de utilización, centros alejados y de difícil acceso (Topografía muy accidentada y falta en algunos casos de accesos adecuados). Osinergmin también en el diagnóstico de la Electrificación Rural – Año 2010 ha detectado que de los 43 sistemas aislados con generación térmica administrados por las municipalidades, en 34 centros de generación los usuarios pagan un costo mayor comparado a usuarios de las mismas características pero que pertenecen a las empresas distribuidoras (ver Fig. N° 1.5), esto se debe a que estos usuarios pagan tarifas reguladas por Osinergmin y además tienen compensaciones dependiendo de su consumo unitario (FOSE) y los usuarios aislados manejados las municipalidades no tienen este beneficio y pagan los costos calculados para cubrir los gastos para la generación eléctrica.

Por lo tanto, es aquí donde existe un potencial para implementar sistemas de generación eléctrica con energías renovables, Solar fotovoltaica y/o eólica, que sirvan de complemento a la generación eléctrica de origen térmico existente.

Dado que para nuestro medio la tecnología solar fotovoltaica es bastante costosa su implementación debe ser cuidadosamente implementada y además hay que contar con la experiencia necesaria para su instalación y selección del tipo de tecnología adecuada para cada aplicación en específico y sobre todo su sostenibilidad del proyecto durante la vida útil del proyecto.

Fig. N° 1.5: Costos Unitarios de Electricidad en localidades aisladas



Fuente: *Diagnostico de la Electrificación Rural en el Perú – Osinergmin – Año 2010*

1.2.1 Problema General

Existen todavía en el Perú Centros Poblados Rurales Aislados que pese a contar con el servicio eléctrico este es caro y restringido de 2 a 5 horas por día, se debe a que la generación de energía eléctrica utilizan el petróleo como combustible, esta situación afecta a la calidad de vida de los pobladores y al desarrollo del centro poblado.

1.2.1 Problemas Específicos

Los problemas específicos asociados al problema general que fueron identificados son:

- a) La generación eléctrica aislada con motores diésel presentan altos costos de generación, cuyas causas son el alto precio del combustible (Petróleo), problemas en el transporte por la lejanía de las zonas de abastecimiento de combustible y la mala gestión de estos sistemas (Instalaciones Deterioradas, rendimientos de los grupos diésel inadecuados)
- b) Las tarifas que fijan los responsables de la operación de estos sistemas son altos y son justificados para cubrir los costos de generación, por lo tanto el servicio es restringido a pocas horas del día especialmente en las noches variando en 2 a 5 horas
- c) Adicionalmente a lo señalado, la generación térmica basado en el uso del petróleo son una fuente de contaminación ambiental por las características propias de esta tecnología, son una fuente de generación de CO₂ la cual es arrojado al medioambiente contribuyendo a aumentar el efecto invernadero.

1.3 Objetivos de la investigación (general y específicos)

Objetivo General

Siendo el objetivo general la de mejorar la calidad de vida de los pobladores, a través del mejoramiento del suministro eléctrico que le permitan tener acceso a una mejor educación, acceso a un mejor servicio de salud, acceso a la posibilidad de desarrollar actividades productivas que le permitan tener mayores ingresos económicos.

Dentro de este contexto nos hemos permitido plantear la Viabilidad Técnica y Económica del Uso de Celdas Fotovoltaicas para Generación de Energía Eléctrica en zonas Rurales de Alta Densidad, las cuales serán utilizadas para diversas aplicaciones para cubrir la demanda de energía eléctrica de diversas cargas (doméstica, Industrial, Comunicación, etc.) y que permitirán cubrir las deficiencias y la falta de suministro eléctrico en estos sectores.

El uso de esta tecnología, es compatible con el medio ambiente, ya es de utilización intensa en países desarrollados, porque han encontrado en su uso una alternativa sostenible, adecuada, viable técnica y económicamente como un complemento para la cubrir las necesidades de energía en la actualidad y en el futuro, preservando sobre manera aquellas energías que utilizan fuentes no renovables como es el petróleo o el Gas Natural actualmente de uso muy difundido

Objetivo específico

Plantear un programa de desarrollo de implementación de paneles fotovoltaicos como alternativa de solución para mejorar la calidad de vida en aquellos centros poblados que no cuentan con suministro eléctrico, así como en aquellos centros poblados rurales que pese a contar con un servicio eléctrico, esta no es de buena calidad y/o cuentan con la energía eléctrica solo por horas, debido principalmente al alto costo del suministro del combustible, a la mala gestión del sistema eléctrico (municipalidades como operadores del sistema) y a la difícil sostenibilidad del sistema porque las tarifas al usuario final no cubren los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Este programa debe incluir entre otros, sistema autónomo fotovoltaico para alimentar un

sistema de cómputo y comunicación para centros educativos, para alimentar las cargas de una posta medica que permita contar con un sistema de refrigeración para almacenar vacunas, sistemas autónomos para alimentar sistemas de bombeo de agua para consumo y para sistemas de riego tecnificado, sistemas autónomos para actividades productivas, para sistemas de alumbrado, además:

- Sustituir la generación eléctrica a base del petróleo como combustible por otra generación más limpia.
- Plantear alternativas de generación eléctrica que no dependa de los medios de transporte.
- Bajar la demanda del Petróleo en el Perú.
- Plantear tarifas eléctricas subsidiadas y reguladas por el organismo regulador.
- Plantear incentivos directos para aquellos usuarios que adopten por una generación propia, utilizando sistemas de subsidios cruzados existentes y utilizados por el estado para usuarios eléctricos dentro de las áreas de concesión de las empresas de distribución eléctrica para usuarios de bajos consumos eléctricos (menores a 30 kwh/ mes) – FOSE y el Fondo de Inclusión Social Energético FISE.
- Plantear normas que regulen el uso intensivo de la autogeneración.
- Disminuir la contaminación ambiental, por vertimientos líquidos, sólidos y gaseosos.

1.4 Justificación

1.4.1 Naturaleza

El uso de las fuentes renovables no convencionales en el mundo (Eólicas, Solar, Biogas, etc.) se han ido incrementando, debido a que las fuentes convencionales de energía como el petróleo, carbón y gas natural son cada más escasos (Fuentes agotables) y altamente contaminantes. En el Perú en localidades aisladas, la generación de energía eléctrica se realiza a través de grupos térmicos diesel que utilizan el petróleo como combustible, por lo tanto los costos d generación en la mayoría de los casos es muy alta.

Habiendo los países incentivado a la utilización de estas fuentes de energía con diferentes planes y programas que van desde incentivos económicos en la inversión (Bonos de carbono) hasta los subsidios económicos a través de pequeños incrementos en las tarifas de modo que se cubran los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento. Actualmente se da en el Perú para las zonas rurales los llamados subsidios cruzados.

1.4.2 Magnitud

Pese a que en el Perú, existen todavía fuentes de energía convencionales, no explotadas en su totalidad (Gran Potencial Hídrico), su explotación a grandes escalas no es precisamente económico para la actual demanda de energía y potencia en el Perú, a menos que el Perú se integre a un sistema sudamericano (Integración Regional) y /o su demanda crezca más de lo previsto, sin embargo la experiencia mundial nos dice que la diversificación de fuentes de generación son los medios más económicos que existen para cubrir la demanda de energía eléctrica de un estado, región o país, pues la alta dependencia de una sola fuente de energía está sujeto a cambios climáticos en algunos casos y/o a la volatilidad de los precios de petróleo en el mundo en otros casos.

Por lo tanto, recogiendo la experiencia en algunos países europeos (como Alemania, España por ejemplo) y latinoamericanos (como México y Brasil), se plantea la utilización de Paneles fotovoltaicas como medios de generación distribuida en zonas rurales con alta dependencias de la generación térmica.

II. Marco Teórico Conceptual de Referencia

Previo al desarrollo del marco teórico conceptual sobre las tecnologías de las celdas fotovoltaicas, se mostrarán aspectos y conceptos importantes que sirvan para entender la teoría y el funcionamiento de las mismas, afortunadamente existen investigaciones y desarrollo de esta tecnología cuya comprensión es de suma importancia antes de aplicar esta tecnología a situaciones reales de falta de suministro de energía eléctrica de una manera confiable y económica. Primeramente se explicará la importancia de conocer la fuente principal de energía es decir la energía solar, explicar conceptos como la Constante Solar, Radiación Solar, Irradiancia Espectral disponible, los modelos matemáticos que explican en forma teórica las principales características de un generador fotovoltaico, sobre el efecto fotovoltaico, el desarrollo de los semiconductores, niveles y bandas de energía, para luego explicar las características técnicas que definen el funcionamiento de una célula fotovoltaica como tensión de circuito abierto, corriente de corto circuito, puntos de máxima eficiencia, factores de forma y rendimientos, así mismo se mostrarán las diversas tecnologías existentes a la fecha y finalmente se describirá los componentes adicionales de una instalación fotovoltaica para una correcta aplicación de este sistema a los problemas por resolver.

El Perú no está ajeno al desarrollo de estas tecnologías, existe ya aplicaciones prácticas de estos sistemas, sin embargo todavía existe un gran escepticismo sobre su desarrollo, siendo nuestro interés demostrar que su aplicación es una alternativa para resolver un problema de falta de suministro eléctrico en el Perú, su desarrollo es perfectamente factible y económicamente adecuado si se tienen en cuenta aspectos indirectos que encajan dentro de un desarrollo sostenible y teniendo en cuenta además que su fuente de generación es casi infinita.

Finalmente podemos decir, que el Perú cuenta con información sobre irradiación solar en diferentes partes de nuestro territorio, la cual se encuentra en el Atlas de Energía Solar del Perú elaborado por un convenio entre el Senamhi y Ministerio de Energía Minas en el año 2003, que servirá de base para el desarrollo del aprovechamiento de la energía solar para obtener calor y electricidad que permitirá satisfacer numerosas necesidades de los

hogares y la industria, siendo estos usos complementarios a otras fuentes de energía convencional.

2.1 Energía Solar

Tal como dijimos anteriormente en nuestra presentación nos atrevemos a decir que la principal fuente energética que nuestro planeta utiliza proviene del sol, de manera que la humanidad está aprovechando esta energía en forma directa a través de medios energéticos como por ejemplo la Energía Eólica, en la que el viento tiene su origen en la energía solar, es decir que el viento se origina por el diferente calentamiento de las distintas zonas de la atmosfera, la energía hidráulica también tiene su origen primigenio en la energía solar, pues el ciclo hidráulico esta originado por la energía solar y si hablamos de la energía derivada de la Biomasa, las plantas utilizan la energía solar mediante su función clorofílica la cual sintetizan materia orgánica a partir del CO₂ atmosférico, agua y sustancias minerales del suelo ²(1) - ver para más detalle referencia bibliográfica (1) y si finalmente hablamos de fuentes de energías no renovables como el petróleo, gas natural, carbón etc. también la energía solar tiene su participación directa en la formación de estas fuentes y cuyas fuentes agotables han hecho virar a desarrollar nuevas fuentes energéticas para satisfacer el consumo energético de la humanidad, por lo expuesto existe un claro interés de los países desarrollados en seguir incrementando la participación de este tipo de energías dentro del balance energético mundial y finalmente si no existiera el Sol, no existiría vida en nuestro planeta tal como lo conocemos el día de hoy, por lo tanto es de vital importancia conocer la principal fuente energética que tenemos a la mano.

El sol produce constantemente energía electromagnética que nos llega directamente a la tierra, según fuentes investigadas, esta fuente lo viene haciendo desde hace unos 4.500 millones de años (1) y seguirá entregando por unos 5.000 millones de años más, la composición del sol según fuentes actuales es de 75% de hidrogeno, 24% de helio y 1% de trazas de todos los elementos conocidos, la fuente de toda la energía solar está presente en su núcleo en el que se produce la fusión nuclear la cual origina una gran cantidad de energía la cual es emitida en forma de radiación ϕ , ondas de altísima

² (1) Energías Renovables para el Desarrollo – Autor: José M^a De Juana – Editorial Paraninfo SA – 2002 - España

frecuencia que en su camino hacia la parte externa del sol va cediendo su energía y disminuyendo su frecuencia, por lo que finalmente las ondas electromagnéticas emitidas por la superficie del sol están fundamentalmente en bandas visibles e infrarrojas. (1)

Finalmente solo para demostrar que siendo la energía solar una fuente infinita podemos realizar algunos cálculos teóricos para demostrar la importancia que tienen la energía solar en su conjunto para la satisfacción de las necesidades energéticas que tiene la humanidad hoy en día.

Para el cálculo de la energía potencial teórica para el Perú se ha utilizado la superficie territorial del Perú y la constante solar normalizada en la superficie terrestre:

Cuadro Nº 2.1: Energía Potencial Solar Fotovoltaica en el Perú

Pos	Característica	Valor
1	Superficie de la Tierra	1.279.999 km de superficie terrestre (no considera el área de los ríos y lagos)
2	Constante Solar Terrestre normalizada	1.000 w/m ²
3	Potencial teórico para el Perú	128 TW
4	Si utilizamos solo el 0,5% de nuestro territorio	Generaríamos 0,64 TW que representa 116 veces más que la máxima demanda del sistema eléctrico del Perú para el año 2014

*Fuente: Elaboración propia

2.2 La Constante Solar Extraterrestre

La constante solar es definida como la cantidad de energía que nos llega del sol en la unidad de tiempo por unidad de superficie normal a la dirección de la radiación incidente, en la superficie exterior de nuestra atmosfera.

Según fuentes consultadas ³(2) la NASA realizó una serie de medidas utilizando para ello diferentes vehículos espaciales, sondas, globos, etc., estableciendo un valor medio estándar de 1.353 W/m² (G_e) con un error estimado de un 1,5%. Este valor ha sido adoptado por la ASTM (American Society For Testing Materials), ANSI (American National Standards Institute) e ISO (International Standards Organization)

³ (2)Centrales de Energías Renovables Autores José Antonio Carta Gonzales, Roque Calero Pérez, Antonio Colmenar Santos y Manuel Alonso Castro Gil Editorial Pearson Educación SA 2009 – Madrid, España

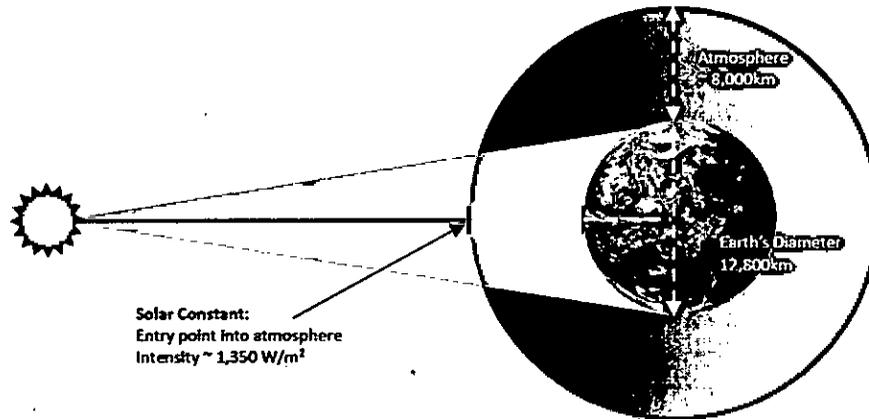


Fig. N° 2.1: Constante solar (G_c) medido en la zona exterior de la atmosfera de la tierra
Fuente Bibliográfica(4)

2.3 Irradiancia espectral

Esta energía que nos llega del sol a la capa extraterrestre, lo hace en forma distribuida en diferentes longitudes de onda, lo que forma el espectro solar extraterrestre. La NASA ha establecido una curva espectral estándar, cuya característica es la que se presenta a continuación:

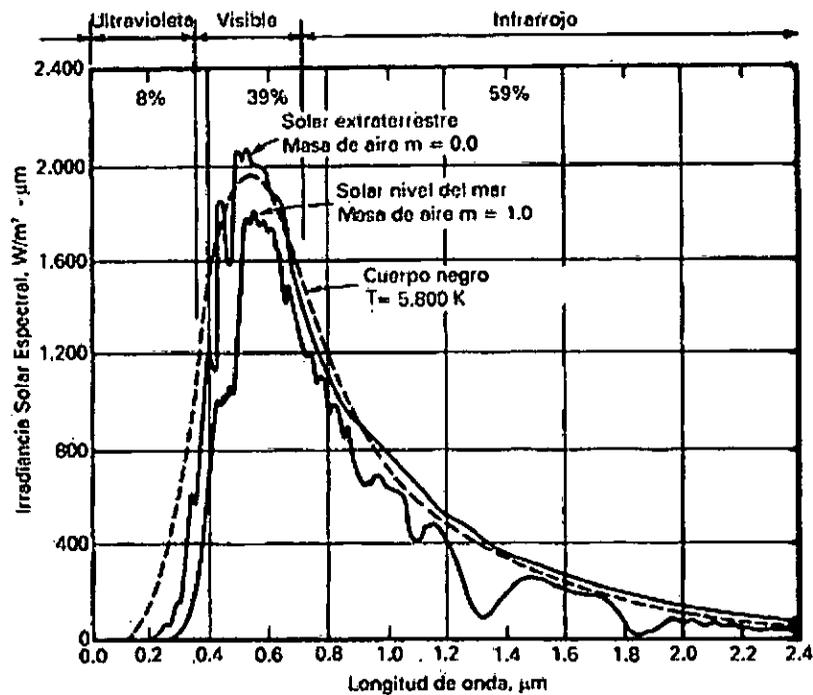


Fig. N° 2.2 : Irradiancia espectral estándar – Tomado de la fuente bibliográfica (1)

La Irradiancia espectral es la intensidad de la radiación recibida en cada longitud de onda, siendo su unidad en $W/m^2 \cdot \mu m$ cuya característica se muestra en la figura 2.2 para valores de longitud de onda que va desde 0,2 y 2,4 μm y en ella se muestra la irradiación extraterrestre para una masa de aire $m=0,0$ la irradiación a nivel del mar para una masa de aire $M=1,0$ y la correspondiente a la emisión de un cuerpo negro a una temperatura de $5.800 \text{ }^\circ K$

Variación de la Radiación Extraterrestre

Con el objeto de aclarar los términos usados, el término de radiación se aplica al cuerpo que radia, mientras que el término de Irradiación se aplica al objeto expuesto a la radiación (X), entonces la superficie terrestre es irradiada, por lo tanto los valores mostrados en los mapas y las tablas son de irradiación solar.

El valor de la constante solar ha sido establecido para una distancia media entre la tierra y el sol cuyo valor es de 149.658.536,5 km (Unidad de longitud astronómica), sin embargo debido a que esta distancia varía durante todo el año por lo tanto la irradiación o la energía solar recibida en el exterior de la atmósfera varía para cada día del año, según fuentes consultadas este valor puede ser calculado con la expresión:

$$G_{0n} = G_c (1 + 0,034 \cos (360n/365,25))$$

Donde :

- n = Día del año contado desde el 1 de enero
- G_c = Constante Solar extraterrestre

En la figura 2.3 se muestra la variación media de la Irradiancia solar extra terrestre

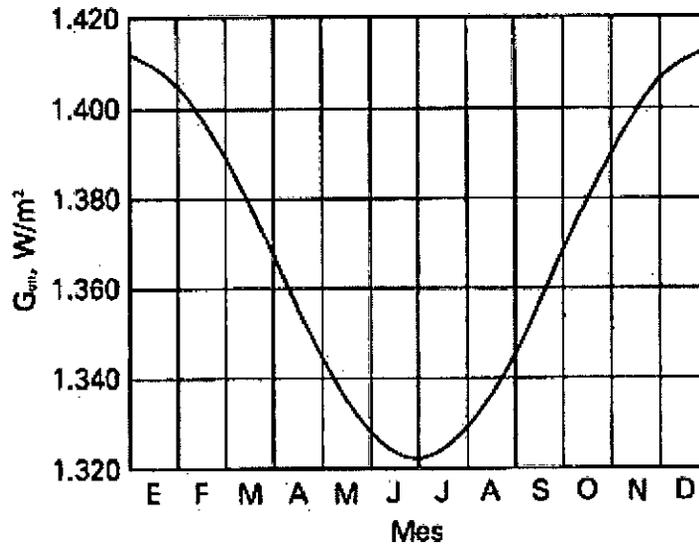


Fig. Nº 2.3 : Variación de la Irradiación solar extraterrestre
Fuente Bibliográfica (1)

2.4 La radiación solar debajo de la atmosfera

La radiación solar, cuando atraviesa la atmosfera, sufre tres fenómenos conocidos como Reflexión, Difusión y Absorción.⁴⁽⁶⁾

Reflexión: Parte de la radiación que llega del espacio es reflejada y el resto atraviesa la atmosfera.

Difusión: La radiación incide sobre las partículas, líquidas y sólidas, en suspensión presentes en el aire y se desvía de la línea recta, de tal forma que una parte de la radiación solar llega a la superficie en cualquier dirección.

Absorción: Los gases de la atmosfera absorben, de forma selectiva, parte de la radiación, que se transforma en calor y no llega a la superficie. Las partículas en suspensión también participan, pero en menor grado.

Entonces la radiación que incide sobre una superficie situada bajo la atmósfera está formada por:

Radiación directa : Es la que llega directamente del sol sin interferencias.

Radiación difusa : Es la radiación que llega, en todas las direcciones, procedente de la esfera celeste visible desde la superficie.

⁴ (6) Generación de energía solar fotovoltaica – Luis Jutglar Banyeres – Editorial Marcombo – España 2012 – primera edición

Albedo : Es la radiación que incide en la superficie procedente de la reflexión sobre el entorno.

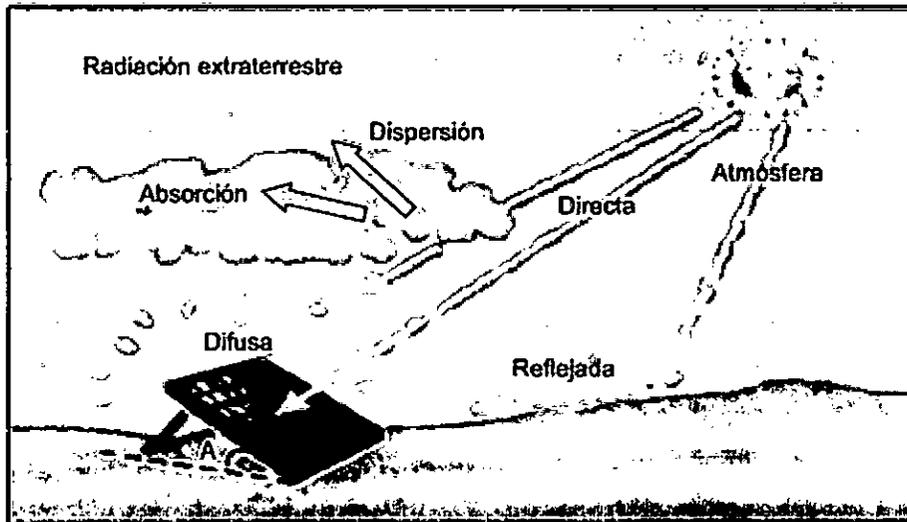


Fig. Nº 2.4 : Radiación sobre una superficie terrestre (fuente : Revista Digital Ecopotencia / www.ecopotencia.com)

Según las fuentes consultadas (4) en promedio alrededor del 20% de la radiación solar es reflejada por las nubes, 6% es reflejada por las moléculas de la atmósfera y un 4% por la superficie de la tierra, por lo tanto debido a la reflexión se pierde cerca del 30%. El 19% de la irradiación es perdida debido a la absorción de las nubes, partículas y moléculas de la atmósfera y de allí que el 51% de la irradiación es absorbida en la superficie de la tierra.

Losses in Solar Radiation

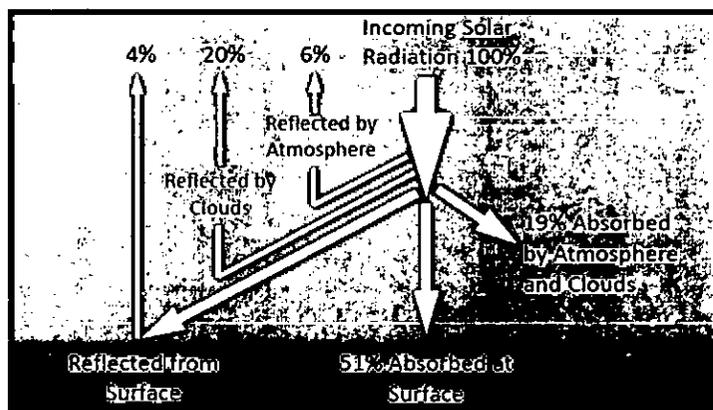


Fig. Nº 2.5 : Pérdidas en la Radiación Solar Fuente Bibliográfica (4)

2.5 Efecto fotoeléctrico

El funcionamiento de una celda fotovoltaica se basa en la explicación del efecto fotoeléctrico que no es otra cosa que la liberación de partículas eléctricamente cargadas que se producen en la materia cuando es irradiada con la luz u otra radiación electromagnética, una de las características demostradas en los diversos experimentos que se han realizado para explicar este efecto, es que la máxima energía posible de los electrones emitidos solo dependen de la frecuencia de la luz incidente en el material y no de su intensidad.

En 1905 A. Einstein pudo explicar el efecto fotoeléctrico basándose en la hipótesis de Planck. Para esto Einstein suponía que la radiación electromagnética está formada de paquetes de energía y que dicha energía depende de la frecuencia de la luz.

A estos paquetes de energía se les denominó posteriormente fotones. De esta manera se puede explicar perfectamente el efecto fotoeléctrico.

La energía de un fotón (E) con una longitud de onda (λ) es igual al producto de la constante de Planck (h) y la frecuencia (ν), además la velocidad de la onda (c) es igual al producto de la frecuencia y la longitud de onda (λ)

$$c = \lambda \cdot \nu$$

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$$

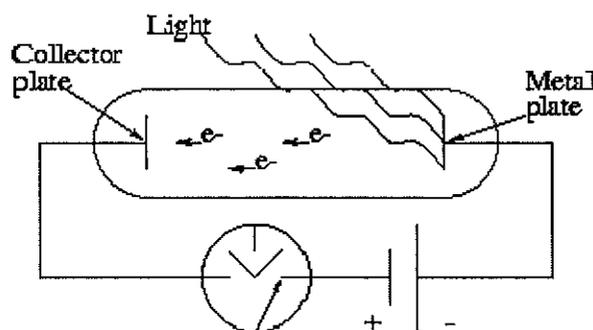


Fig. 2.6: Dispositivo experimental para el efecto fotoeléctrico

2.6 Semi conductor, niveles de energía y bandas de energía

Existen tres tipos de materiales con características peculiares respecto a su capacidad de conducción eléctrica, aquellos que son buenos conductores de corriente eléctrica entre los que se encuentran los metales y otros los llamados aislantes que no son buenos conductores de corriente eléctrica, así mismo existe un tercer material los llamados semiconductores que bajo la influencia de ciertas condiciones se comporta como conductor de corriente o como aislante.

Los materiales utilizados para la fabricación de las celdas fotovoltaicas son los semiconductores en las cuales por el efecto fotovoltaico, es decir que estos materiales permiten convertir la luz solar (energía) en electricidad. A continuación vamos a explicar y dar algunos conceptos importantes a fin de entender claramente el funcionamiento de la conversión de la energía solar cuando esta es absorbida por una celda fotovoltaica.

Bandas de Energía

En los materiales sólidos a nivel molecular existen niveles de energía ocupadas por los electrones de los átomos, en la que se distinguen tres zonas claramente diferenciadas, las llamadas bandas de valencia, bandas de conducción y una zona llamada banda prohibida.

Bandas de Valencia (BV), están ocupadas por los electrones de valencia de los átomos, es decir aquellos electrones que se encuentran en la última capa o nivel energético de los átomos. Los electrones de valencia son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica.

Banda de Conducción (BC), está ocupada por los electrones libres, es decir aquellos electrones que se han desligado de sus átomos y pueden moverse fácilmente. Estos electrones son los responsables de conducir la corriente eléctrica

Banda Prohibida, es la zona que separa la banda de conducción de la banda de valencia, denominado ancho de banda prohibida (E_g), a este valor mínimo se le denomina "Gap" de energía expresada en electrón Voltios.

Las características para que algunos materiales sean buenos conductores de corriente eléctrica es que no exista separación entre estos niveles de energía de manera que los electrones pueden saltar entre bandas, esto es característica de los metales, sin embargo cuando la separación entre bandas es mayor el material se comporta como un aislante, en el caso de ciertos materiales llamados semiconductores la separación entre bandas es pequeña y permite el salto de algunos electrones bajo ciertas circunstancias de presión y temperatura o que se le añada ciertas impurezas, esta zona entre la banda de valencia y banda de conducción es la denominada banda prohibida o GAP en la que no se encuentran electrones, ver figura N° 2.7

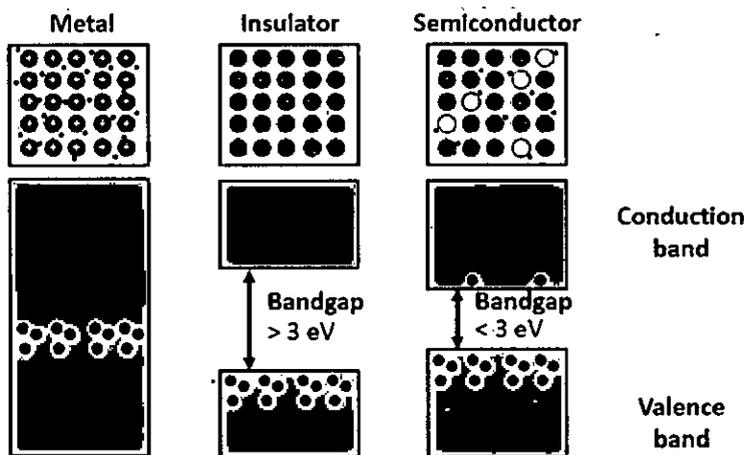


Fig. 2.7: Bandas de energía en diferentes materiales - Fuente bibliográfica (4)

En los aislantes la banda prohibida es amplia del orden mayor a 3 eV (4), mientras que en los semiconductores esta banda es menor de 3 eV, por ejemplo el silicio cristalino tiene una banda prohibida del orden de 1,1 eV (1)

$$1 \text{ eV (electrón Voltio)} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Cuando los átomos reciben un aporte de energía del exterior, algunos electrones de la banda de valencia pueden alcanzar la banda de conducción dejando por lo tanto un hueco en la banda de valencia ver figura 2.8

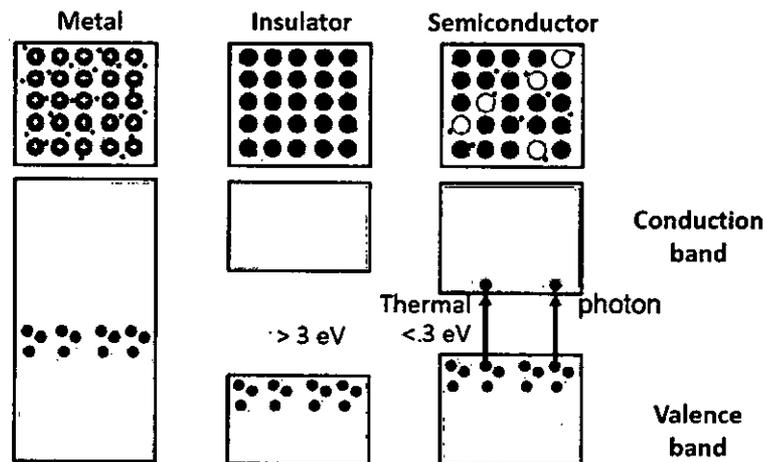


Fig. 2.8: Bandas de energía en diferentes materiales 2 - fuente bibliográfica (4)

En general para el caso de semiconductores el valor de E_g está en torno de 1,5 eV, como se dijo un semiconductor hecho de Arseniuro de Galio su E_g es del orden de 1,43 eV y de Aluminio Arseniuro de Galio su E_g es del orden de 1,7 eV

Por lo tanto en un semiconductor, algunos de los electrones pueden tener suficiente energía térmica para saltar desde la banda de valencia a la banda de conducción, esta energía puede ser proporcionada por la luz, esto significa que si la luz tiene fotones que tienen una energía más grande que la banda prohibida, el semiconductor se hace más conductivo. Las propiedades conductivas son determinadas por los electrones en la banda de conducción y los huecos en la banda de valencia.

2.7 Semiconductores tipo "p" y tipo "n"

Cuando a la estructura cristalina de un semiconductor puro (intrínseco) se introducen impurezas de otro elemento con distinto número de electrones de valencia entonces se obtienen otro tipo de semiconductor, si por ejemplo a una estructura de germanio que tiene cuatro electrones de valencia con otro elemento como el fósforo o antimonio que poseen cinco electrones de valencia entonces por cada átomo quedará un electrón suelto, este electrón suelto ocupará un nivel energético muy próximo a la banda de conducción, por lo tanto a condiciones ambientales este electrón queda libre de moverse, a este tipo de semiconductor se le ha denominado tipo "n"

Pero si en cambio al mismo semiconductor germanio se le añade átomos con tres electrones de valencia (Boro, Indio y Galio), aparece una estructura cristalina con una serie de huecos que son libres de moverse de un átomo a otro, a este tipo de semiconductor se le denomina tipo "p" (1)

Semiconductor Junction

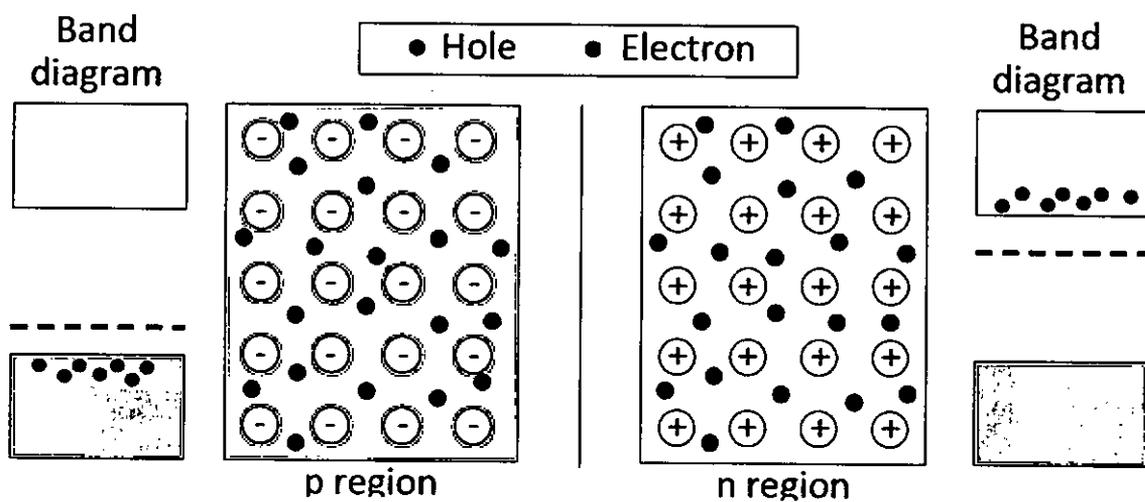


Fig. Nº 2.9: Semiconductores tipo "p" y tipo "n" – fuente bibliográfica (4)

En resumen en un semiconductor tipo "n" están presentes un gran número de electrones libres en la banda de conducción que son los portadores de carga mayoritarios, los huecos creados por la agitación térmica que son los portadores de carga minoritarios.

En cambio en los semiconductores del tipo "p" en gran número de huecos (carga positiva) están presentes en la banda de valencia y aquí son los portadores de carga mayoritaria y existen electrones correspondientes a la agitación térmica que son los portadores de carga minoritaria.

2.8 Célula fotovoltaica

Las células fotovoltaicas son fabricadas de semiconductores cristalinos uniendo semiconductores del tipo "p" con los del tipo "n", si en estas condiciones la luz solar incide en la célula los fotones comunican energía a los electrones del semiconductor y pueden atravesar la barrera de potencial, siendo expulsados fuera del semiconductor a través de

un circuito exterior, entonces se produce la corriente eléctrica. Los electrones tras recorrer el circuito externo vuelven a entrar en el semiconductor por la cara opuesta.

Solar cell operation

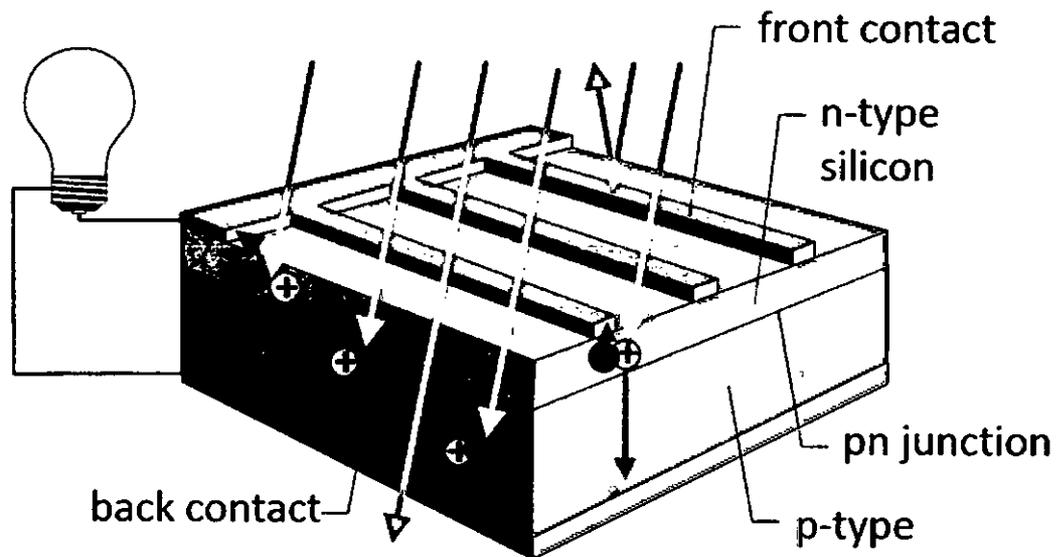


Fig. N° 2.10: Esquema de la operación de una celda Solar – Fuente bibliográfica (4)

Cuando se pone en contacto un semiconductor del tipo "n" con otro del tipo "p" hay un flujo de electrones desde el semiconductor tipo "n" a los huecos del semiconductor tipo "p" y viceversa, creándose así un campo eléctrico que se hace cada vez más grande a medida que los electrones y los huecos continúan difundándose hacia lados opuestos, este proceso continúa hasta que no se puede intercambiar más electrones y huecos, consiguiéndose un campo eléctrico permanente sin la ayuda de campos eléctricos externos.

2.9 Parámetros de funcionamiento de una célula fotovoltaica

En esta parte se va a presentar los parámetros de funcionamiento de una célula fotovoltaica con la finalidad de entender su performance, se describirá una idealización del circuito equivalente de la célula, las características de tensión y corriente, puntos de máxima potencia, los factores de forma y rendimiento.

2.9.1 Circuito equivalente de una célula fotovoltaica

Para el estudio de las características operativas de una célula fotovoltaica se ha planteado un modelo que se muestra en la Fig. N° 2.11, en este circuito idealizado se plantea una fuente de corriente y un diodo conectado en paralelo, la fuente de corriente es representado a la corriente que se genera por la intensidad de la radiación solar incidente sobre la célula, la unión "p - n " de la célula fotovoltaica es representada por el diodo (polarizado en directa), la resistencia R_s (resistencia en serie) representa la caída interna de potencial hasta los terminales de contacto y R_{sh} (resistencia en paralelo)

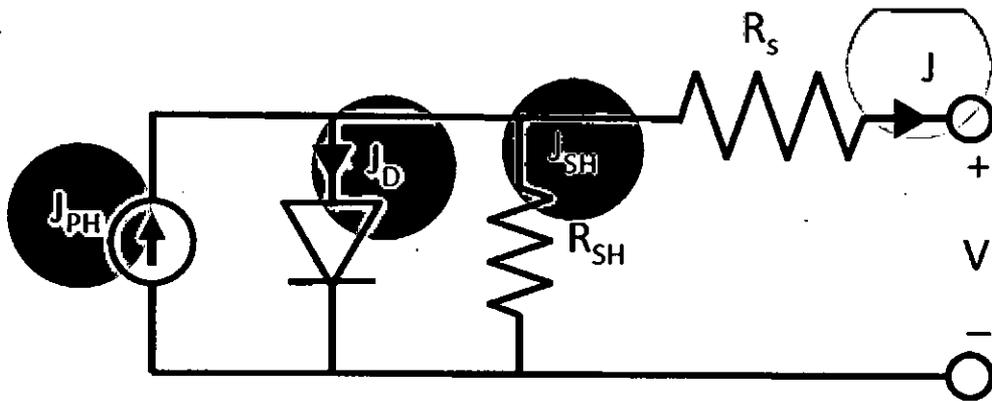


Fig. N° 2.11: Circuito equivalente Celda FV

De aquí podemos escribir según las leyes de kirchoff y considerando un parámetro aplicable a las celdas solares, densidad de corriente J (mA/cm²)

$$V_{ideal} = V + J \cdot R_s$$

$$J = J_{PH} - J_D - J_{SH}$$

$$J_{SH} = (V + J \cdot R_s) / R_{SH}$$

$$J = J_{PH} - J_0 \cdot (\exp(q \cdot (V + J \cdot R_s) / (k_B \cdot T)) - 1) - (V + J \cdot R_s) / R_{SH}$$

Donde:

q	=	Carga elemental del electrón ($1,6 * 10^{-19}$ Columbus)
K_B	=	Constante de Boltzman ($1,38 * 10^{-23}$ Joules/°K)
V	=	Tensión de la célula fotovoltaica en Voltios
T	=	Temperatura en °K
J_0	=	Densidad de Corriente de polarización Inversa (Corriente de Fuga), A/m^2
J_{PH}	=	Densidad de Corriente en la celda fotovoltaica, A/m^2

En base a esta simplificación del circuito equivalente de una célula muchos autores han podido comprobar experimentalmente ⁽⁵⁾ las curvas características de la corriente generada en función de la tensión, la cual se explicará con más detalle en el siguiente párrafo.

2.9.2 Tensión de circuito abierto, corriente de corto circuito

La corriente de corto circuito, I_{sc} es la corriente que se obtiene de la célula cuando la tensión en sus bornes es de cero voltios, es la máxima corriente que se puede obtener de la célula.

La tensión de circuito abierto, V_{oc} , es la tensión obtenida cuando no hay corriente generada, constituye la máxima tensión que se puede extraer de una célula Solar. En las células de Si de tipo medio es del orden de 0,6 V, mientras que en las de GaAs es de 1 V.

⁵ (5) Paper Universidad Nacional del Noroeste – Argentina Llamazares, Alberto - Busso, Arturo J. - Bajales Luna, Noelia - Generación fotovoltaica : caracterización de una celda comparando datos experimentales y simulados aplicando un modelo teórico simple – año 2000

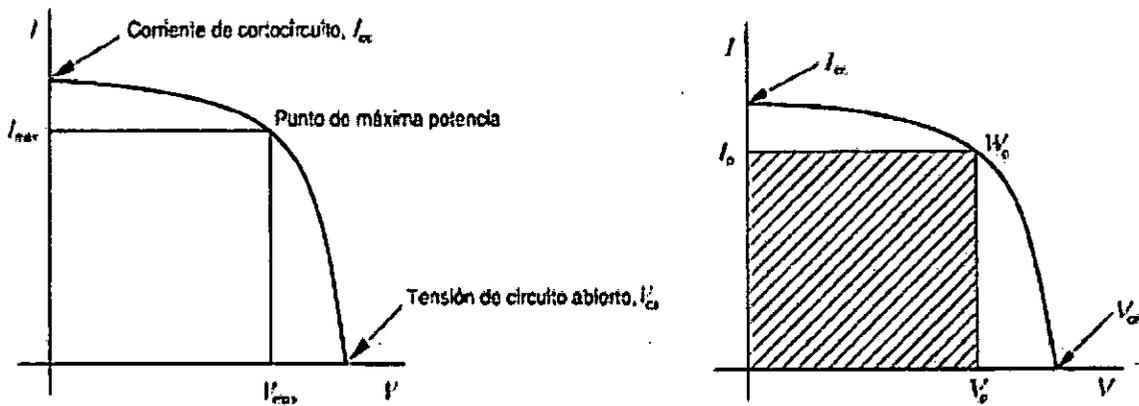


Fig. N° 2.12 Característica V – I de una celda fotovoltaica

2.9.3 Conexiones Serie - Paralelo

Por lo general, la tensión, proporcionada por una sola unidad no tiene una utilidad práctica ya que la tensión alcanzada es del orden de 0,6 V a circuito abierto, por lo tanto es necesario conectar un determinado número de células para conseguir tensiones con cierta utilidad, los paneles por lo general cuentan con células conectadas en serie que varía entre 30 y 36.

Por otro lado los paneles tendrán que conectarse en serie o en paralelo para proporcionar la tensión e intensidad nominal de la instalación, constituyendo de esta manera el generador fotovoltaico.

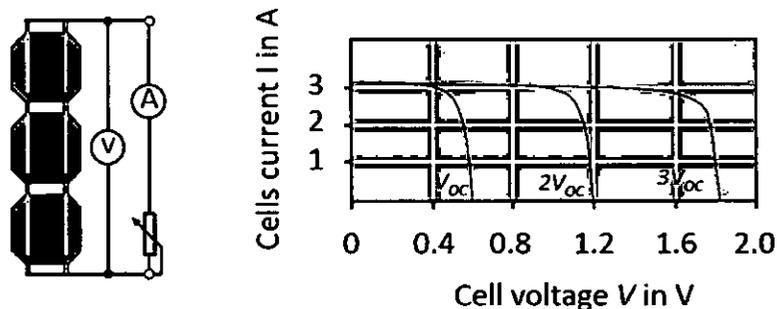


Fig. N° 2.13: Conexiones en serie

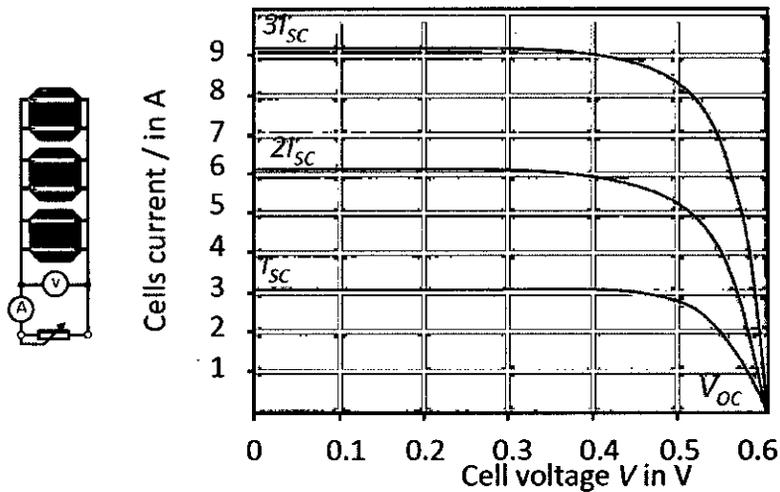


Fig. N° 2.14: Conexiones en Paralelo

2.9.4 Punto de máxima eficiencia, factor de forma y rendimiento

Potencia Máxima, P_{max} : La potencia P es el producto de la corriente por la tensión tanto en cortocircuito como en circuito abierto la potencia es cero (0), por lo tanto habrá una máxima potencia entre los valores de tensión $V = 0$ y V_{oc} ,

$$P_{max} = V_{pmax} \cdot I_{pmax}$$

Factor de forma, FF : Relaciona la Potencia máxima, con la potencia obtenida como producto de la tensión en circuito abierto y la corriente de cortocircuito, el factor de forma puede valer como máximo la unidad, la célula tendrá un mejor comportamiento cuando el factor de forma esté más cerca a la unidad.

$$FF = P_{max} / (V_{oc} \times I_{sc})$$

Eficiencia o rendimiento (η): Expresado en %, es el parámetro que define el funcionamiento de la célula solar. Representa la relación entre la potencia que obtenemos de la célula y de la potencia de la Luz que incide en ella.

$$\eta = I_{sc} \times V_{oc} \times FF / (A \times P_{sol}) \times 100$$

Donde:

P_{sol} = Potencia luminosa por unidad de Área que se recibe del sol en forma de fotones en condiciones estándar es de 100 mW/cm^2 (1000 W/m^2), que corresponde a un espectro solar estándar de AM1,5 a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

A = Área de la célula en cm^2

Las células solares y módulos fotovoltaicos son producidos por muchas empresas y laboratorios diferentes. Además diferentes tecnologías de células solares son investigadas y vendidas en el mundo entero, por tanto, es de suma importancia para definir un espectro solar de referencia que permita una comparación de todas las diferentes células solares y módulos fotovoltaicos. El estándar industrial normalizado es el que corresponde a un espectro AM1.5, que corresponde a un ángulo de $48,2$ grados con respecto a Cenit, en realidad el verdadero valor que corresponde a un espectro AM1.5 es una irradiación total de 827 W/m^2 . Sin embargo para fines prácticos se ha adoptado una irradiación espectral (AM1.5) = $1,000 \text{ W/m}^2$ y que está muy cerca de la máxima radiación recibida en la superficie de la Tierra. La energía generada por un módulo fotovoltaico bajo estas condiciones se expresan así en valores pico de potencia, siendo el Watt pico referido, W_p

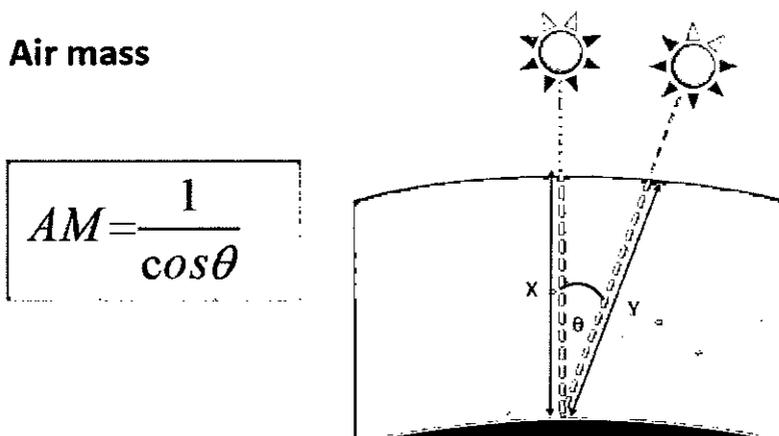


Fig. N° 2.15 : Variación de la masa de aire respecto al ángulo de posición del sol con respecto al Cenit. – Fuente (4)

Irradiance and spectral power density for AM1.5

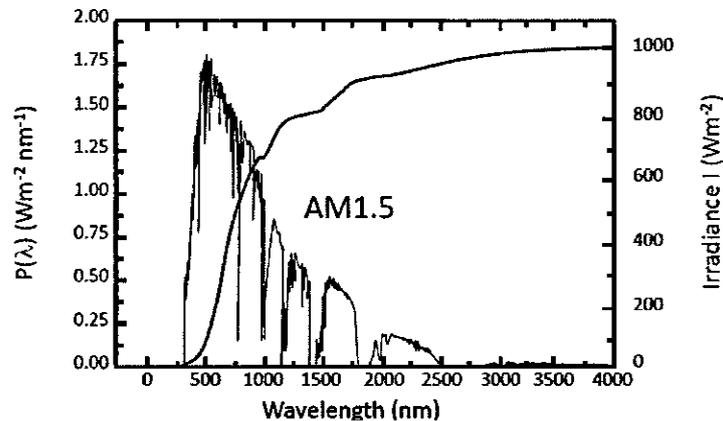


Fig. N° 2.16 : Variación de la Densidad de Potencia Espectral y la Irradiación con respecto a la longitud de onda del espectro solar – Fuente (4)

2.9.5 Factores que afectan la Característica V – I del generador fotovoltaico

La curva V- I se ve afectada por diversos factores ambientales tales como la Intensidad de Iluminación (Irradiancia), la temperatura y la distribución espectral de la luz solar.

Efecto de la Intensidad de Iluminación (Irradiancia)

La Irradiancia afecta principalmente a la corriente generada, de aquí que la corriente I_{cs} de corto circuito es proporcional a la irradiación

$$I_{sc}(E2) = I_{sc}(E1) * E2/E1$$

Donde :

$I_{sc}(E2)$: es la corriente de corto circuito para un nivel de irradiancia E2

$I_{sc}(E1)$: es la corriente de corto circuito para un nivel de irradiancia E1

Esta ecuación es válida para variaciones de la irradiancia a temperatura constante y resulta una aproximación cuando esta varía, ya que supone despreciar los efectos que la temperatura tiene sobre la corriente de cortocircuito.

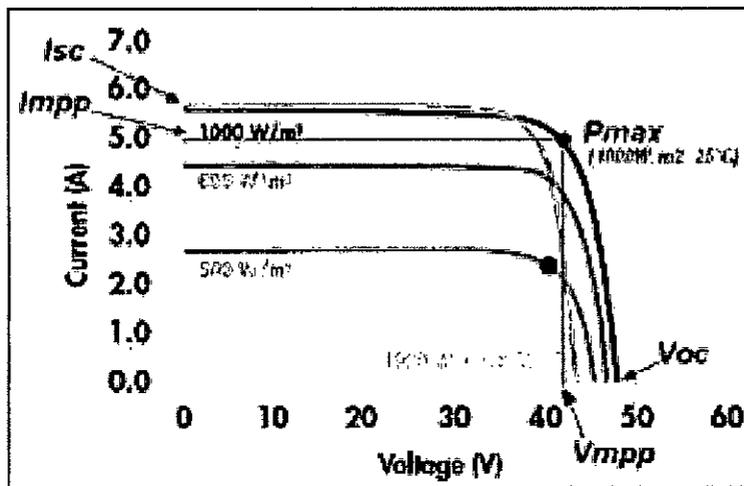


Fig. Nº 2.17: Efecto de la irradiación sobre la Característica V - I de un generador fotovoltaico

Efecto de la Temperatura

La temperatura afecta principalmente a los valores de voltaje de la característica V-I y tienen su mayor influencia en el voltaje de circuito abierto, aunque también modifica los valores del punto de máxima potencia y el valor de Isc (aunque su influencia es muy leve).

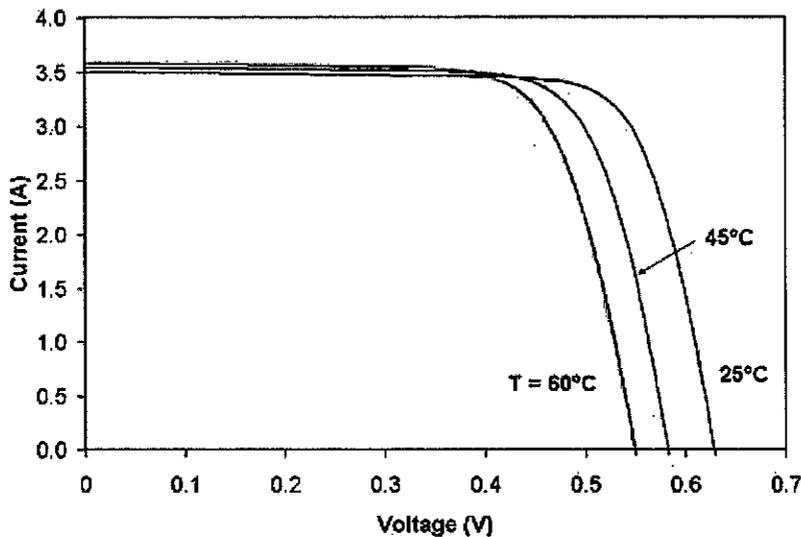


Fig. Nº 2.18: Variación de la característica V-I del generador fotovoltaico al variar la temperatura manteniendo la irradiación constante.

La variación de los parámetros pueden representarse por tres coeficientes α , β y γ , así por ejemplo α representa la variación de la corriente de corto circuito con la temperatura, β la variación del voltaje de circuito abierto y finalmente γ la variación de la potencia máxima.

En general los fabricantes incluyen en las hojas de datos técnicos los valores de estos tres coeficientes, cuyos valores más comunes pueden ser:

$$\alpha = dI_{sc}/dT = + 0.04\%$$

$$\beta, = dV_{oc}/dT = - 0.37\%$$

$$\gamma = dP_{max}/dT = - 0.44\%$$

Los valores presentados son valores típicos para células de silicio mono cristalino expresados en porcentaje, sin embargo es más común encontrarse estos valores como referencia a los de una célula del módulo fotovoltaico, para el caso de una célula de 100 cm² se tiene los siguientes valores:

$$\alpha = 1,5 \text{ mA/}^\circ\text{C}$$

$$\beta, = -2,3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$$

$$1/P_{max} * \gamma = -0.0044 \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

Condiciones Nominales de Operación (CNO)

Para calcular la temperatura de la célula o módulo se puede calcular relacionando la temperatura ambiente y un nivel irradiancia comúnmente aceptado para este fin en donde los valores referenciales son los siguientes:

Irradiancia	:	800 W/m ²
Temperatura	:	Temperatura de operación Nominal de la Célula (TONC)
Velocidad de Viento	:	1 m/s
Temp. ambiente	:	20 °C

La TONC representa la temperatura que alcanzaría las células solares para un nivel de irradiancia de 800 W/m², con temperatura ambiente de 20 °C, velocidad del viento de 1 m/s e incidencia normal.

La TONC también viene dado en las hojas de datos técnicos, por ejemplo para un módulo de Silicio Cristalino suele estar en torno a los 47 °C, para el cálculo de la

temperatura de la célula a otras condiciones ambientales se calcula por la siguiente expresión :

$$T_c = T_a + E * (TONC - 20) / 800$$

Donde :

T_c: es la temperatura de la célula o módulo

T_a: es la temperatura ambiente

TONC: es la Temperatura de Operación Nominal de la Célula

E: es la irradiancia

2.10 Tipos de Células fotovoltaicas

En la mayoría de las células fotovoltaicas que se encuentran en explotación en estaciones de uso terrestre, se han empleado el Silicio, en sus formas Mono cristalinas, Poli cristalinas y Amorfo como material semiconductor de base. Sin embargo estas tecnologías han sido desarrolladas obteniéndose una relación directa entre las variables rendimiento y costo habiendo una proporcionalidad entre ellas, es decir que si se quieren obtener rendimientos altos los procesos de fabricación también se incrementan por lo tanto aumentan los costos de fabricación, de la bibliografía consultada podemos decir básicamente que como consecuencia de la búsqueda de alternativas de fabricación a las ya desarrolladas a partir de las láminas de silicio se han desarrollado células de lámina delgada y las llamadas células Tándem las cuales serán descritas más adelante.

Células de Silicio Cristalino

Existen dos tipos de células de silicio cristalino, las mono cristalinas y las poli cristalinas, en las células mono cristalinas los átomos de silicio están perfectamente ordenados formando todo el cuerpo un solo cristal, en cambio en las poli cristalinas están formadas por agrupaciones de pequeños cristales, cuyo grado de orden es menor, dado que dentro del cristal los átomos están perfectamente ordenados pero los cristales no se unen en forma ordenada.

Las células mono cristalinas presentan un rendimiento entre un 14% y 17%, mientras que las poli cristalinas presentan un rendimiento menor entre 12 y 14%, pero son más baratas que las mono cristalinas.

Células de lámina delgada

Las células de silicio cristalino tiene un espesor que podría considerarse grande debido a que este material se comporta como un semiconductor indirecto lo que implica tener un coeficiente de absorción relativamente reducido de la luz incidente y consecuentemente la necesidad de utilizar un espesor considerablemente menor para reducir las pérdidas por transmisión. Alternativamente a esta tecnología, los investigadores han planteado la necesidad de reducir el material planteando células de espesor reducido del orden de los micrómetros que pueden ser fabricadas si se emplean otros materiales semiconductores del tipo directo o si se incorporan procedimientos de confinamiento óptico en células de silicio cristalino, en las cuales se han fabricado de anchuras del orden de 10 a 50 micrómetros y son las que constituyen las células de lámina delgada entre las que podemos citar :

Silicio Amorfo

Arseniuro de Galio

Teluro de Cadmio

Diseleniuro de Cobre e Indio (Células CIS)

A continuación se mostrará un resumen de las características de estos tipos de células fotovoltaicas de lámina delgada

Tipo de Células	Características principales
Células de Silicio Amorfo	Los átomos que la componen no se colocan conformando una estructura determinada, es decir que no conservan orden alguno, debido a lo cual existen muchos enlaces vacíos, esta falta de orden permite su contaminación y por consiguiente merma su rendimiento, además presenta problemas para su dopaje con materiales del tipo <i>p</i> o <i>n</i> , ya que al introducirlas en la red, esta se reajusta para satisfacer las necesidades de enlace de las impurezas. Para atenuar este efecto se añade al material cierta cantidad de hidrogeno, cuyos átomos llenan muchos de los defectos y

	<p>reducen la anchura del GAP es decir de la Banda prohibida, haciendo posible la incorporación de materiales para lograr materiales del tipo p o n respectivamente, El empleo de la pasivación en la cara expuesta a la luz (suelen ser materiales tipo p) han permitido alcanzar rendimientos del orden del 13%.</p> <p>Anchura de la Banda Prohibida es del orden 1,7 eV, es un semi conductor indirecto, Proceso de fabricación más barato, son muy inestables, ya que experimentan una degradación por la exposición a la luz que hacer caer drásticamente su eficiencia en casi 4%.</p>
Células de Arseniuro de Galio	<p>Semi conductor del tipo directo, anchura de banda prohibida 1,42 eV, valor que se sitúa muy próximo al correspondiente a la máxima eficiencia de aprovechamiento del espectro solar para una sola unión. El material tiene facilidad para enlazarse con otros materiales de menor anchura de banda prohibida permitiendo células tándem. El coste de las células de arseniuro de galio y su alta eficiencia, cercana al 25% han hecho que sean utilizadas en usos espaciales o instalaciones terrestres de concentraciones</p> <p>Junto con sus elevados costos tiene el problema de su toxicidad de sus componentes</p>
Células de Teluro de Cadmio	<p>Se han alcanzado rendimientos medios del orden del 10%, este material presenta unas características muy parecidas al arseniuro de galio en cuanto a su anchura de banda prohibida, 1,45 eV, posee un alto coeficiente de absorción como semiconductor directo y una elevada velocidad de recombinación superficial. Tiene también el inconveniente medio ambiental derivado de la toxicidad del cadmio.</p>
Células de diseleniuro de indio y cobre (CIS)	<p>Es un semiconductor ternario del tipo directo con un GAP de 1 eV, la máxima eficiencia obtenida con estas células se sitúan en el orden del 17% y en módulos de tamaño comercial han arrojado rendimientos del orden del 9% con una estabilidad prolongada en periodos de varios años.</p>
Células de silicio cristalino de lámina delgada	<p>Este tipo de células han sido desarrolladas a fin de reducir costos. Presenta los mismos aspectos positivos que las células convencionales, es decir que los materiales utilizados no presentan toxicidad y es muy abundante y la eficiencia se mantiene estable en el tiempo.</p>
Células Tándem	<p>Las investigaciones han desarrollado células multiunión o tándem que permite un mejor aprovechamiento de la energía contenida en el espectro solar, en esta línea con células reales de dos uniones se han logrado</p>

eficiencias del orden del 35% y con células de tres uniones se podría llegar teóricamente hasta un 50%.

La esencia es superponer semiconductores con distintas anchuras de banda para conseguir una adaptación al espectro solar, con el fin de optimizar la respuesta conjunta, la célula de mayor GAP se sitúa en la parte superior y la de menor en la parte inferior, una buena combinación han dado la unión de GaAs y GaSb alcanzándose rendimientos de cerca del 35% (1)

En la Fig. N° 2.19 se muestra la evolución de las eficiencias alcanzadas por las diferentes tecnologías de Celdas Fotovoltaicas, investigaciones realizadas por diferentes universidades y centros de investigación especializados.

Best Research-Cell Efficiencies

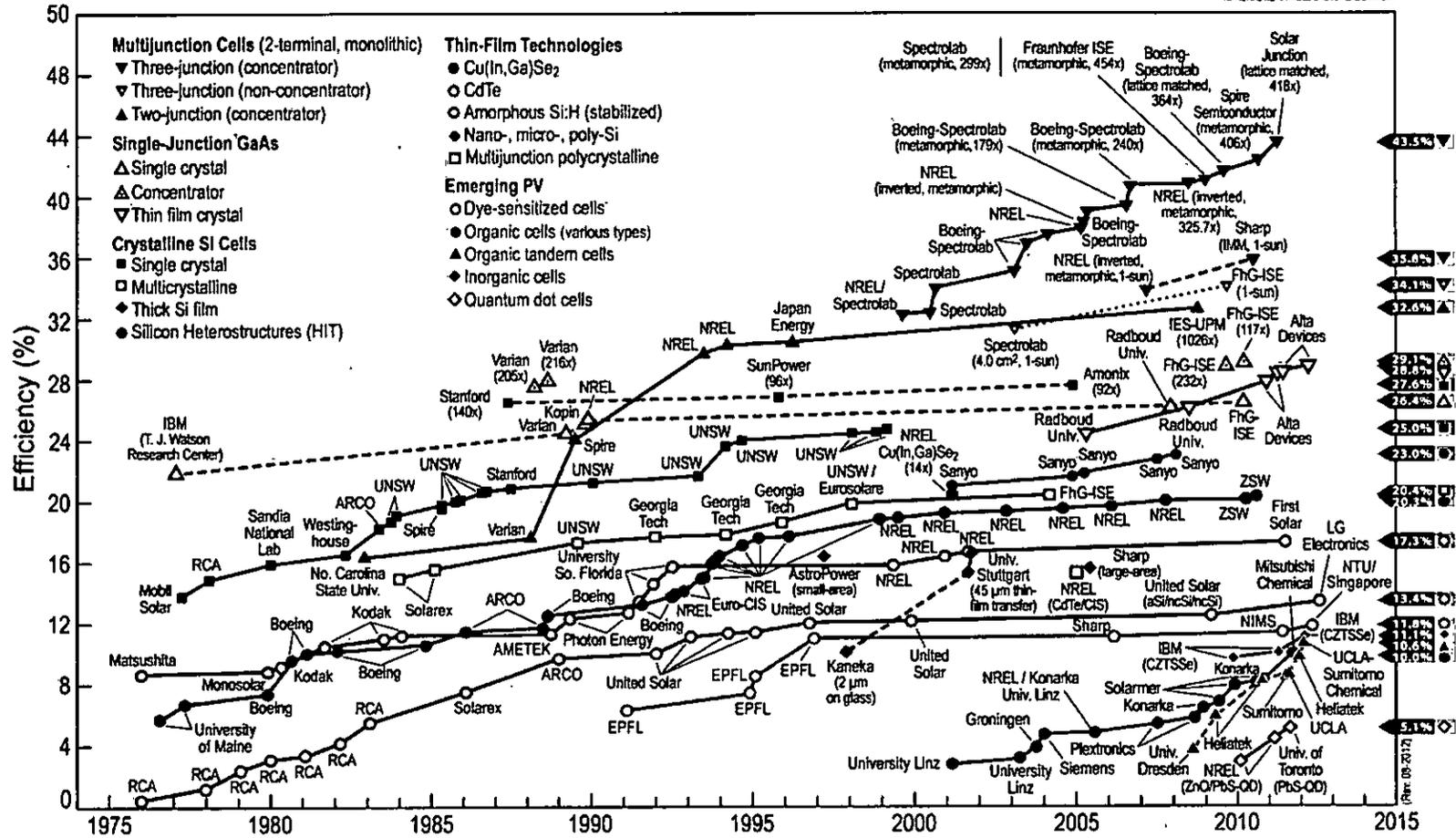


Fig. 2.19: Evolución de Eficiencias de las celdas fotovoltaicas

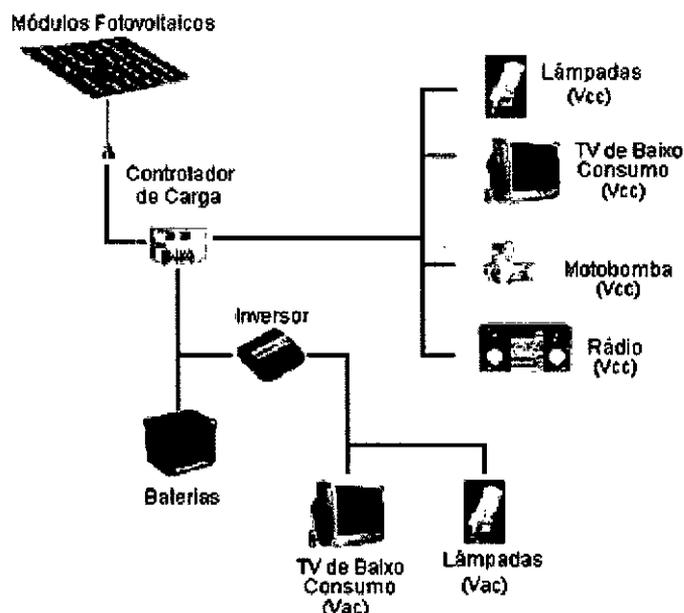
Fuente (4): Curso sobre energía solar dado por la Universidad de DELF – Holanda - 2014

2.11 Componentes de una instalación fotovoltaica

Un sistema fotovoltaico (ver fig. N° 2.20) es un conjunto de componentes que permiten la conversión de la energía solar en energía eléctrica, cuyos componentes básicos son los siguientes:

- Módulo fotovoltaico: es el dispositivo donde se transforma la energía solar en energía eléctrica.
- Acumulador de energía: conformado por un conjunto de baterías que almacenan la energía eléctrica generada por el módulo fotovoltaico cuando la demanda es menor que la energía producida por el módulo fotovoltaico.
- Cargas eléctricas: son la demanda (cargas a las cuales van a atenderse con el sistema fotovoltaico), que pueden ser cargas en corriente continua o cargas en corriente alterna.
- Conjunto de equipos : que controlan la energía producida por el panel fotovoltaico (Controlador), y transforman la corriente continua producida por los paneles a corriente alterna (Convertidor) y que completan un sistema fotovoltaico

Fig. N° 2.20: Esquema típico de un módulo fotovoltaico



Haremos una breve descripción de los principales componentes del sistema fotovoltaico con la finalidad de dar algunas características básicas de su tipo y funcionamiento.

Sistema de Acumulación

Cuando se tienen que alimentar la demanda de energía eléctrica durante la noche o en periodos de varios días nublados se hace preciso utilizar algún sistema de acumulación de energía (Baterías).

En general la energía solar fotovoltaica se puede acumular bajo las siguientes formas:

- Producción y almacenamiento de aire comprimido
- Producción y almacenamiento de energía térmica
- Producción y almacenamiento de hidrogeno
- Almacenamiento de energía cinética en volantes de inercia
- Baterías Electroquímicas
- Energía potencial hidráulica

De todas estas posibilidades, la acumulación en baterías electroquímicas es la más común, siendo esta la más económica en la mayoría de los casos.

Debido a las características de funcionamiento de una aplicación fotovoltaica, las baterías utilizadas en esta aplicación deben cumplir ciertos requisitos, dado que permanecen durante largos periodos con carga parcial y sus descargas se producen lentamente en periodos de más de 100 horas, así mismo están sometidas a cargas y descargas diarias en forma parcial, deben tener una baja auto descarga y deben además exigir un bajo mantenimiento.

En el cuadro adjunto se muestra las principales características de los diversos tipos de baterías, de las cuales las más interesantes son las de plomo acido que tienen un precio económico y una larga vida útil.

CARACTERISTICAS	Pb-ácido	Ni-Cd	Ni-Fe	Ni-Zn	Zn-Cl ₂	Zn-Br ₂	Redos	Na-S Alúmina	LiFeS
Temperatura de operación (°C)	ambiente	ambiente	ambiente	ambiente	30 - 60	50 - 60	ambiente	300 - 400	425 - 500
Rendimiento energético (%)	80	60 - 75	55-70	60-65	65-70	70-75	65-80	70-75	80
Densidad de Energía (Wh/Kg)	50-60	40-60	45-60	60-70	80-140	60	55	90-250	100-220
Densidad de Potencia (W/Kg)	150-200	150-300	100-150	150-300	100-130	-	-	150-250	120-220
Autodescarga (%/mes)	2-15	3-10	40-80	12	80	25	0	0	< 10
Ciclos de vida (ciclos)	1500-2000	1500-3000	1500-2000	300-1000	200-900	600-1500	1000-5000	200-1500	200-1000
Vida (años)	5-10	5-15	7-12	5-10	10	10	20	-	-
Electrolito	H ₂ SO ₄	KOH	KOH	KOH	ZnCl ₂	ZnBr ₂	HCl	Cerámico	Sal fundida
Funcionamiento	Electrodos sólidos				Circulación de electrolito			Altas temperaturas	

Cuadro N° 2.2: Características de las Baterías Solares - fuente (05)

Sistema de Regulación

Si se introduce una batería de acumuladores en la instalación fotovoltaica es necesario instalar un sistema de regulación que permita por un lado evitar que cuando el panel fotovoltaico no genere no se convierta en una carga, por lo tanto es necesario bloquear la corriente que provenga de los acumuladores, esto generalmente se realiza a través de un diodo cuya intensidad inversa de saturación es muy pequeña.

El otro control es para controlar las cargas a los acumuladores, evitando tensiones de carga mayores a los que se especifica para este tipo de acumuladores, esto permite alargar la vida útil de las baterías, este dispositivo se le denomina regulador de tensión.

Finalmente se requiere un control de la descarga de la batería de acumuladores, evitando que se descarguen por debajo de un cierto nivel de carga evitando de esta manera la destrucción prematura de la batería, esto se consigue a través de un relé de mínima tensión asociado a un contactor de potencia que desconecta el conjunto de cargas asociados a la batería.

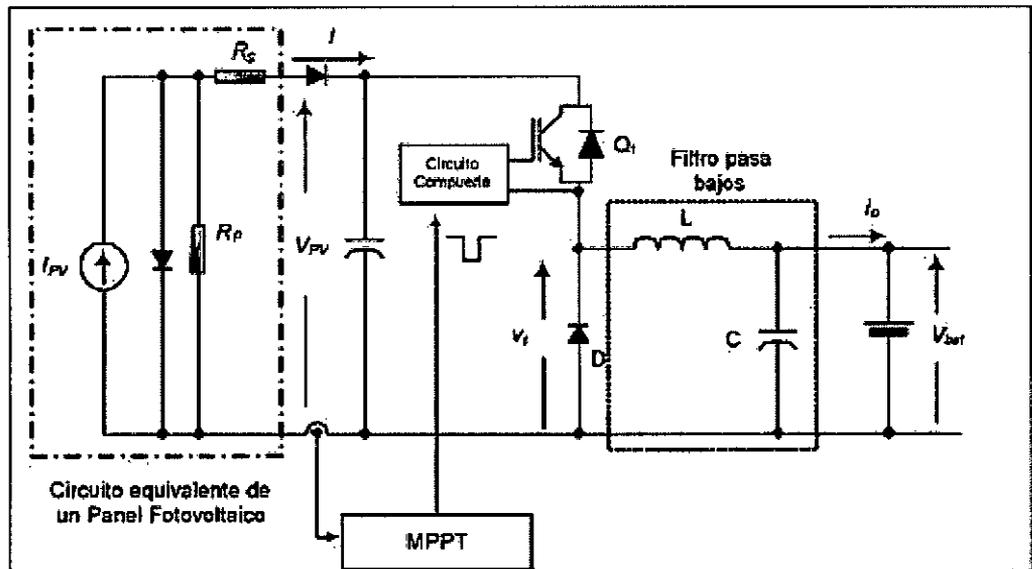


Fig. N° 2.21: Sistema de Regulación de Carga

Inversores

Para alimentar a cargas de corriente alterna el sistema fotovoltaico debe contar con un inversor que convierta la corriente continua a corriente alterna. Las funciones principales de los inversores son: Inversión DC/AC, modulación de la onda alterna de salida y regulación del valor eficaz de la tensión de salida.

Los inversores pueden ser monofásicos o trifásicos a 60 Hz con un amplio rango de potencias, estos pueden ser clasificados en función de la forma de la onda de salida:

- De onda cuadrada
- De onda modificada o quasi-senoidal
- De onda senoidal (muy parecida a la onda de la red eléctrica)

Los inversores de onda cuadrada son los más económicos, sin embargo la onda resultante tiene un gran contenido de armónicos no deseados, la distorsión armónica total (THD) es bastante alta en torno al 40% y su rendimiento está en el orden del 50 – 60%, la potencia de sobre carga es baja entre el 10 – 20 % de la potencia nominal, se utilizan normalmente para cargas bajas inductivas o resistivas.

Los inversores de onda semi-senoidal o cuasi-senoidal, presentan un THD del 20% y su rendimiento son mayores del 90%, son utilizados en electrificación rural para

alimentar a cargas habituales como electrodomésticos, computadoras y equipos musicales.

Los inversores senoidales tienen un cuidadoso filtrado de la señal generada, son las recomendadas para alimentar a las cargas en AC, no presentan ningún problema de THD o estabilidad de la tensión.

2.12 Sistema Fotovoltaico Autónomo

Un sistema fotovoltaico autónomo puede abastecer de energía a sus cargas conectadas y puede acumular la energía en un banco de baterías, siendo esta última configuración la que normalmente se adopta por ser el más económico específicamente para cargas pequeñas. Los componentes del sistema fotovoltaico fueron descritos en el punto 2.11

En el Perú se han instalado sistemas fotovoltaicos autónomos especialmente para electrificación rural impulsados por el gobierno como parte de la expansión de la frontera eléctrica, a pesar de haberse logrado avances significativos en la gestión de estos sistemas, todavía hay problemas de sostenibilidad, estos sistemas son financiados por el gobierno y operados por ADINELSA y empresas Regionales de Electricidad.

La aplicación de estos sistemas se ha expandido para sistemas de telecomunicación, y para sistemas de alumbrado en domicilios rurales incluyendo a las cargas especiales existentes.

En estos sistemas se puede distinguir dos tipos de instalaciones fotovoltaicas aisladas, las instalaciones que utilizan solamente la energía solar y las que utilizan un equipo auxiliar de generación de energía eléctrica que suele denominarse instalaciones híbridas.

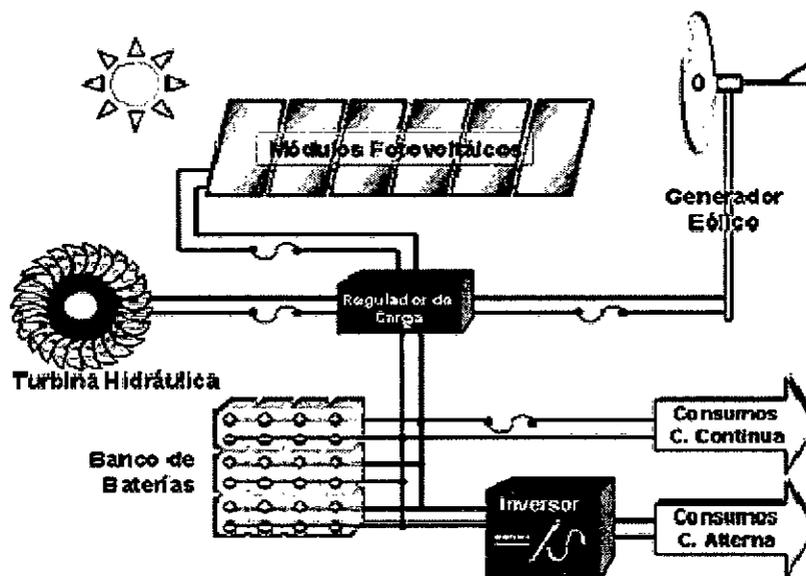


Fig. N° 2.22: Sistemas híbridos con energías renovables

Los sistemas aislados de la red son especialmente indicados para el suministro eléctrico de zonas remotas o en regiones donde la seguridad de abastecimiento de energía eléctrica es baja. Estos sistemas ofrecen ventajas de escalabilidad ilimitada del generador fotovoltaico desde unos pocos watts de potencia hasta varios cientos de kilovatios (Kw) para electrificar mini redes eléctricas.

La concepción en estas micro redes de varios sistemas fotovoltaicos que alimentan a una red aislada, combinados a generadores diesel, pero para conseguir suministros autónomos y estables de electricidad fotovoltaica es imprescindible contar con un sistema de almacenamiento de energía.

2.13 Sistema fotovoltaico conectado a una red

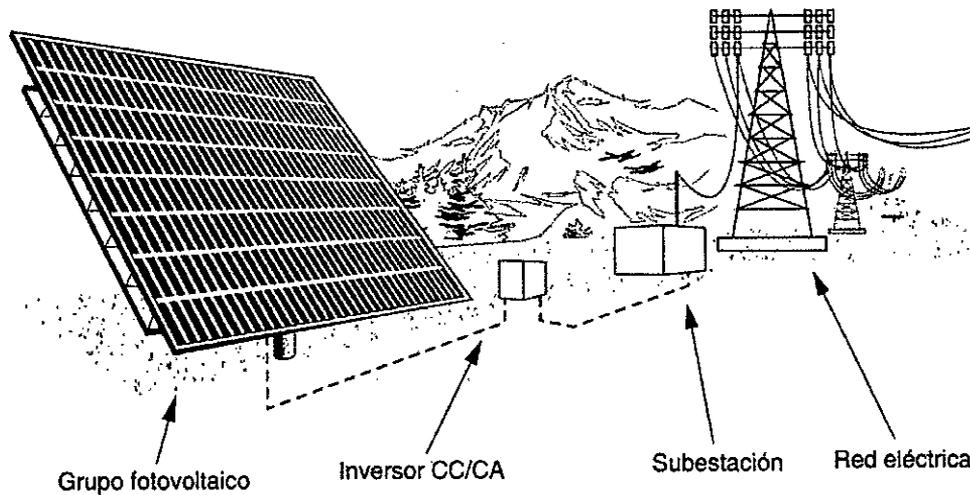
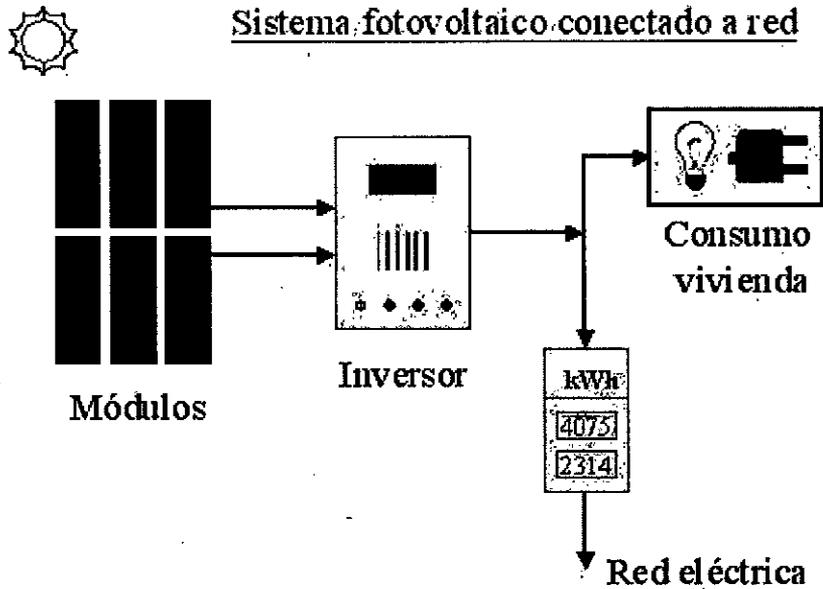
Este sistema es el más común en países en desarrollo con gran incentivo al uso de recursos renovables no convencionales la generación de energía la consume parte el usuario con este sistema y la diferencia la consume la red o el usuario consume tanto del sistema fotovoltaico como de la red de energía.

El sistema es más simple, pues aquí se puede prescindir del banco de baterías si fuese el caso.

Los sistemas acoplados a la red ofrecen una escalabilidad ilimitada y pueden abarcar un amplio espectro desde un sistema de 1 kilovatio pico hasta sistemas al aire libre de varios megavatios pico.

Actualmente en el Perú ya se han instalado cinco (05) centrales eléctricas fotovoltaicas de 20 MW cada una en el Sur del Perú, todas ellas conectadas a la red del SEIN a las tensiones de 66 a 138 kV, se han instalados tres centrales fotovoltaicas del tipo fijas y dos centrales con sistemas de seguimiento del sol.

Fig. 2.23:



2.14 Energía generada

Un factor importante es el cálculo de la energía generada por el sistema fotovoltaico a fin de evaluar su performance y los aspectos económicos que se derivan del uso de

estas tecnologías, básicamente dependerá de la radiación solar en la zona donde se pretenda instalar este sistema.

Para obtener valores aproximados, Ver fuente ⁶(9) se puede utilizar el concepto de factor de capacidad (FC) que no es otra cosa que la relación entre la energía generada por el sistema en un determinado tiempo y la energía generada a su capacidad nominal en el mismo periodo de tiempo

$$FC = \int P(t)dt / P_{nom} * T$$

Donde:

T	=	Periodo analizado
P(t)	=	Potencia generada en el instante t del periodo T
P _{nom}	=	Potencia nominal del sistema

Este factor es muy útil para estimar la energía producida por el sistema fotovoltaico, que como se dijo anteriormente dependerá de la radiación solar en la zona de instalación. Según la información técnica y recogida de la experiencia en países desarrollados este factor de capacidad varia en un rango de 0.16 a 0.21 aproximadamente, por lo tanto si queremos evaluar la energía producida por este sistema será:

$$kWH \text{ (producido)} = kWp * FC * T$$

Será la energía producida por el sistema fotovoltaico en un periodo T, T puede ser un día (24 horas), una semana etc., la clave es estimar con gran acierto el FC del equipo en la zona donde se va instalar.

2.15 Definiciones de Términos Básicos

Potencia Pico (kWp)	Es la capacidad nominal máxima del panel solar en unidades de potencia pico.
Factor de capacidad (FC)	Es la relación entre la energía generada por el sistema en un determinado tiempo y la energía generada a su capacidad nominal en el mismo

⁶ (9) Tesis de Maestría – David Orosco – Año 2000

	periodo de tiempo.
Panel Fotovoltaico	Es el dispositivo donde se transforma la energía solar en energía eléctrica.
Acumulador de Energía	Conformado por un conjunto de baterías que almacenan la energía eléctrica generada por el módulo fotovoltaico cuando la demanda es menor que la energía producida por el módulo fotovoltaico.
Cargas eléctricas	Son las cargas a las que el panel fotovoltaico tiene que alimentar.
Controlador	Equipo que controla la energía producida por el panel fotovoltaico.
Inversor y/o convertidor	Equipo que transforma la corriente directa producida por el panel a Corriente alterna en 220 Vca
Adinelsa	Empresa administradora de los activos eléctricos específicamente rurales en el Perú .
Osinerming	Entidad reguladora, supervisora y fiscalizadora en el campo de la energía eléctrica y minera en el Perú.
Recursos de Energías renovables	Son las fuentes de generación de energía limpias como la energía solar, la del viento, las pequeñas centrales hidroeléctricas, las fuentes geotermales.
Senamhi	Entidad estatal que se encarga del monitoreo de los parámetros ambientales a nivel nacional y los pronósticos del tiempo.
Radiación solar	Es la energía electromagnética del sol, emitida, transferida o recibida.
Sistema aislado	Conjunto de centros poblados electrificados pero no conectados al SEIN
Sistema Eléctrico Interconectado Nacional	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional que consta de fuentes de generación y líneas de transmisión eléctrica.
Generación distribuida	Centrales eléctricas de pequeña magnitud conectadas a un sistema de distribución existente.

2.16 Abreviaturas utilizadas

SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
RER	Recursos Energéticos Renovables
FC	Factor de capacidad de un sistema fotovoltaico
A	Amperio
V	Voltio
KW	Kilo watts de potencia
KWH	Kilo watts hora (energía)
FOB	Precio de un bien de importación puesto en el puerto de origen, antes de su embarque
MEM	Ministerio de Energía y Minas
DGER	Dirección General de Electrificación Rural
FV	Fotovoltaico

III. VARIABLES E HIPOTESIS

3.1 Definición de Variables

Las variables de la investigación deberán resolver los problemas actuales de desabastecimiento y/o restricción de la oferta de energía en centros poblados aislados de alta densidad y con alta dependencia de generación térmica.

Variable Independiente:

Variable X: Implementación de sistemas fotovoltaicos distribuidos

Variable Dependiente:

Variable Y: Mejora la calidad de vida del poblador rural

3.2 Operacionalización de las variables

La implementación de sistemas fotovoltaicos distribuidos deberá mejorar la oferta de energía en estos sistemas aislados dando beneficios tangibles a los usuarios, a las empresas de generación y al país.

Los beneficios esperados a los usuarios es que ya no tendrán restricciones en la oferta y podrán desarrollar sus proyectos personales y productivos particulares, los beneficios a las empresas disminuirán sus costos de operación, menores consumos de petróleo y beneficios para el país pues se disminuirán las importaciones de combustible por lo tanto habrá un ahorro de divisas, así como la contaminación ambiental

Operacionalizando las variables formuladas, se determinaron los indicadores pertinentes para cada una de las variables que a continuación se indican:

Variable X: Implementación de Sistemas Fotovoltaicos distribuidos

Se propone los siguientes indicadores:

- X1 = Costos de Generación fotovoltaica (Soles / Kwh)
- X2 = Energía Generada por el Sistema Fotovoltaico (kWH)

Variable Y: Mejora de la calidad de vida del poblador

Indicador:

Y1 = Aumento del Consumo de electricidad KWH/Habitante

Y2 = Disminución de la emisión de CO2

Operacionalización de las variables:

$X1 + X2 \rightarrow Y1 + Y2$

3.3 Hipótesis

Hipótesis General

La viabilidad de la implementación de celdas fotovoltaicas en localidades rurales aisladas de alta densidad con fuerte presencia de generación térmica mejorará la calidad de vida de los usuarios

Hipótesis Específica

La viabilidad de la implementación de celdas fotovoltaicas en localidades rurales de alta densidad permitirá reducir los costos de generación eléctrica, permitiendo que el tiempo del servicio se aumente a las horas del día.

La viabilidad de la implementación de las celdas fotovoltaicas en localidades aisladas de alta densidad permitirá contar con tarifas más económicas y que por este efecto muchas más personas puedan acceder al servicio eléctrico en el centro poblado.

La viabilidad de la implementación de las celdas fotovoltaicas en localidades rurales de alta densidad permitirá a disminuir los niveles de contaminación ambiental, pues las celdas fotovoltaicas transforman directamente la energía luminosa en energía eléctrica.

IV. METODOLOGIA

En este capítulo se propone la metodología de la investigación desarrollada, se realizara una análisis de la situación actual de la implementación de sistemas fotovoltaicos en el Perú, así como a manera referencial se presentará la implementación de los Sistemas Fotovoltaicos en el mundo, esto nos permitirán analizar las ventajas que presentan estos sistemas fotovoltaicas como generación eléctrica complementaria para abastecer el incesante incremento del consumo de electricidad, así como corregir aquellos problemas presentados en sistemas desarrollados en nuestra patria y cuyos proyectos iniciales no fueron exitosos.

Adicionalmente, se analizara en detalle las inversiones necesarias para implementar estos sistemas, así como los costos de generación que incluyen además de las inversiones los costos de operación y mantenimiento.

Finalmente, se propondrá su implementación basados en incentivos ya existentes en el Perú, aplicables a usuarios de bajo consumo a través de subsidios cruzados como es a través del Fondo de Inclusión Social (FISE) y el fondo de subsidio eléctrico (FOSE)

4.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se utiliza es de tipo aplicado, lo que significa que los aportes están dirigidos a que estos se puedan aplicar lo vertido en las conclusiones y recomendaciones ya que los datos que se están utilizando son reales.

Por el tipo de investigación, el presente estudio reúne los requisitos necesarios para ser considerado como una "Investigación Aplicada", porque los alcances de esta investigación son más prácticos, evidentemente más aplicativos y se auxilian en la data de la tecnología fotovoltaica, así como en las encuestas realizadas. Todo este planteamiento representa el sustento basado en la experiencia y numérico que permitirá llegar a las conclusiones del trabajo de investigación.

4.1.1 Desarrollo de la energía Solar fotovoltaica en el mundo

Antes de evaluar el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Perú es necesario mostrar algunos comentarios y datos respecto al desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el mundo.

En la figura adjunta se muestra la evolución de la instalación de los módulos fotovoltaicos en el mundo en la que se puede ver claramente que en el sector de la unión europea su desarrollo ha sido muy significativo, donde Alemania sobresale por ser el país que lidera el desarrollo e implementación de este tipo de tecnologías para la generación de energía eléctrica.

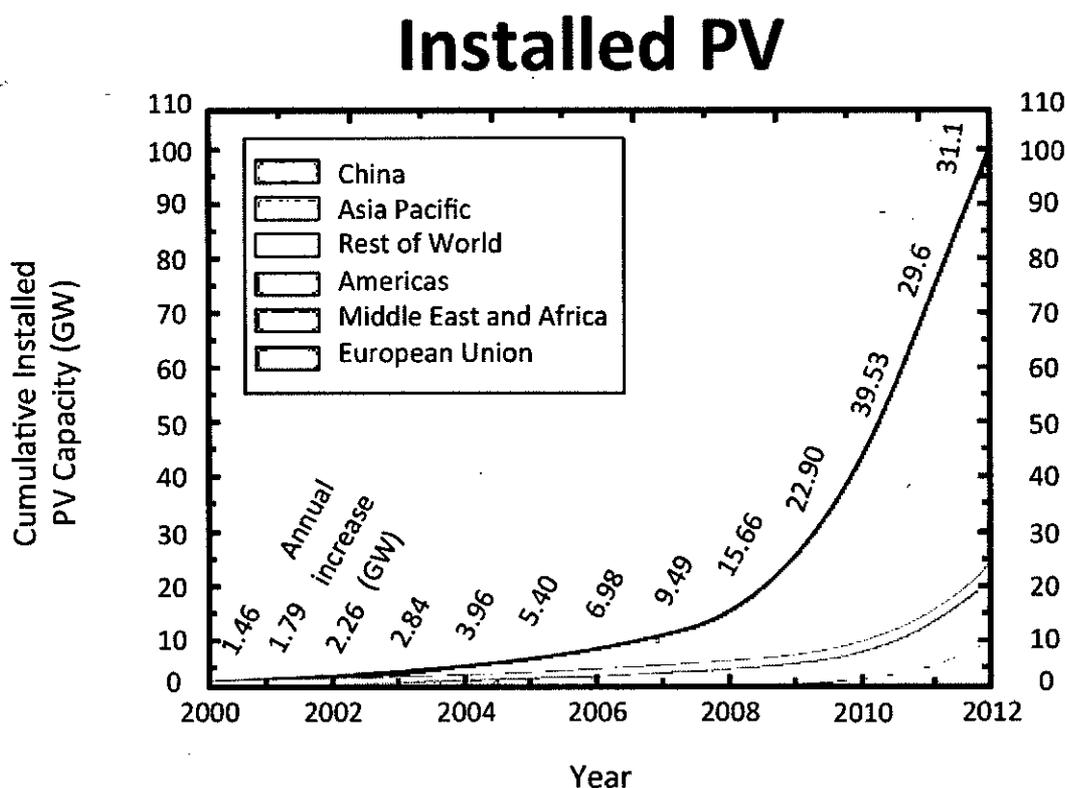


Fig. N° 4.1: Evolución de la Potencia Instalada de Centrales fotovoltaicas en el mundo

Fuente: Curso de Energía Solar- Universidad de DELFT Holanda - 2014⁷

⁷ Curso de Energía Solar – Universidad de DELFT – Holanda – EDX Courses - 2014

Installed Power (no fossil source)

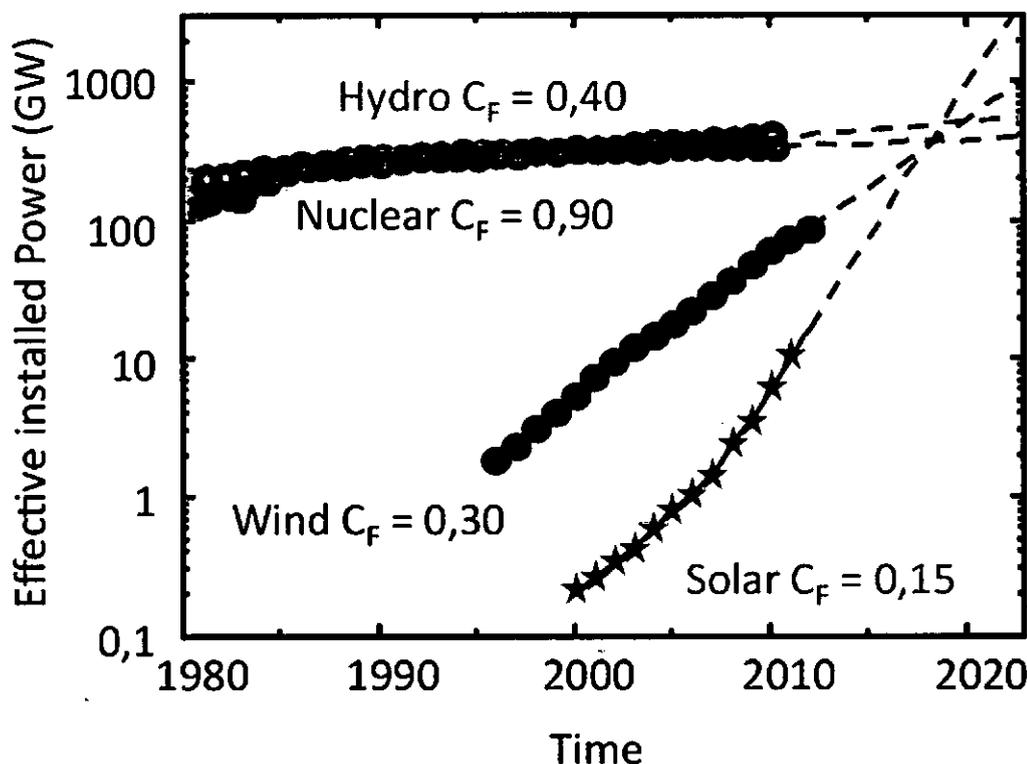


Fig. N° 4.2: Evolución comparativa de las distintas fuentes de generación eléctrica
Fuente: Curso de Energía Solar- Universidad de DELFT Holanda - 2014

En el cuadro N° 4.1 se muestra la evolución de la potencia instalada a nivel mundial hasta el año 2012, en la que se aprecia que la potencia instalada a esa fecha superaba los 102 GW, siendo Europa, como se dijo anteriormente, el mayor mercado fotovoltaico en el mundo, pues solo en el año 2012 se instaló unos 17,2 GW de nueva capacidad fotovoltaica lo cual equivalía al 55% del total instalado en el año 2012, China ocupaba en segundo puesto con una instalación de 5 GW de nueva capacidad en el mismo año 2012 y Estados Unidos instaló en el mismo año 2012 3,3 GW de potencia fotovoltaica. ⁸(Fuente: Revista Renewables – Made in Germany 2014)

La potencia instalada acumulada alcanzó en Europa los 70 GW en el 2012, seguido de China con 8,3 GW, Estados Unidos con 7,8 GW y Japón con 6,9 GW.

⁸ Revista Renewables – Made in Germany - 2014

Cuadro N° 4.1: Evolución de la Potencia instalada fotovoltaica en MWp

AREA	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
ROW	751	807	887	964	993	1003	1108	1150	1226	1306	1590	2098	2098
MEA					1	1	1	2	3	25	71	192	601
CHINA	19	24	42	52	62	70	80	100	140	300	800	3300	8300
AMERICAS	146	178	225	290	394	501	650	863	1209	1752	2780	4959	8717
APAC	355	495	686	961	1198	1500	1825	2096	2631	3373	4956	7628	12397
EUROPA	129	262	396	598	1305	2289	3281	5310	11020	16850	30472	52884	70043
TOTAL	1400	1766	2236	2865	3953	5364	6945	9521	16229	23606	40669	71061	102156

ROW : Resto del mundo; MEA : Oriente Medio y Africa; APAC: Pacífico Asiático

Fuente: Revista Renewables - Made in Germany - 2014

De la información presentada, se puede concluir que cada vez la presencia de las energías renovables en la generación de energía eléctrica es cada vez más importante, toda vez que su desarrollo obedece a una nueva tendencia mundial basados en una tecnología limpia no contaminante que es compatible con la conservación de nuestro medio ambiente y se espera que para el año 2020 tenga una fuerte presencia y un peso relevante en la matriz energética mundial.

Por otro lado en la fig. 4.2 se ve que la tasa de crecimiento es mucho mayor principalmente en las dos fuentes de energía renovable la Solar y la Eólica con respecto a otras fuentes de energía.

4.1.2 Desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Perú

Luego de la revisión de diferentes fuentes técnicas, bibliografía existente, visita a los diferentes organismos que de alguna manera han introducido la tecnología de las celdas fotovoltaicas para alimentar a pequeñas cargas eléctricas y para conexión a la red nacional del SEIN, han permitido conocer las experiencias en nuestro país en el uso de esta tecnología fotovoltaica, estas instituciones como la Universidad Nacional de Ingeniería, La Dirección General de Electrificación Rural del Ministerio de Energía y Minas, Empresas Operadoras como Adinelsa, Organismos no Gubernamentales (ONGs), Empresas de Comunicaciones, OSINERGMIN – RER, etc. han aportado experiencias que servirán de base para la implementación de estos sistemas energéticos en nuestro país. Aquí es bueno comentar que nuestro país cuenta con niveles de radiación solar muy por encima de los países europeos, como por ejemplo

el caso de Alemania, quienes han desarrollado e implementado este tipo de tecnologías pese a que sus fuentes de radiación solar presentan niveles moderados.

Electrificación Rural

Según las fuentes revisadas en la década de los 80's y 90's se implementó un primer proyecto de electrificación rural fotovoltaica (ERFV) en el Perú fue un proyecto de la cooperación técnica alemana que instaló entre los años 1986 y 1996 en el Departamento Puno cerca de 500 sistemas fotovoltaicos domiciliarios (SFD), en un marco "pre-comercial" (subsidiados). Según información revisada, el CER-UNI realizó 10 años después del inicio del proyecto una evaluación del sistema y concluyeron que todos los usuarios estaban muy contentos con esta tecnología y los (SFD) han seguido en operación.

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) ha instalado entre 1995 y 1998 un total de 1500 SFD en diferentes regiones del Perú, mayormente en comunidades de la selva y muy dispersos. Inicialmente el MEM planteó que el proyecto debería incentivar a empresarios privados para invertir en proyectos fotovoltaicos bajo un esquema de mercado. Finalmente se optó de dar al proyecto un objetivo social, pidiendo al beneficiario solamente una contribución para los costos de mantenimiento del SFD a su disposición. Estos SFD están ahora en propiedad de la empresa estatal ADINELSA, quién lo administra bajo un modelo tarifario y para facilitar esta administración, ha creado en cada comunidad una asociación de usuarios.

De la experiencia registrada específicamente en los sistemas de SFD instalados en la localidad de San Francisco (Ucayali), en el proyecto se instalaron 32 sistemas SFD en una primera etapa equipados con controladores de carga del tipo electromecánico y se instalaron 82 sistemas SFD en una segunda etapa con controladores de carga de estado sólido, fallando los controladores de carga instalados en la segunda etapa, cuyas causas fueron estudiadas y analizadas por los responsables del proyecto cuyo resultado no resulta del todo claro en el informe, pero los controladores electromecánicos instalados en la primera etapa resultaron más confiables que los controladores de estado sólido de la segunda etapa. Habiendo propuesto un buen sistema de protección de puesta a tierra para los controladores de estado sólido dando así mejores resultados en su operación, por otro lado las baterías también han sufrido

deterioros por este problema en la que según la fuente analizadas (⁹) se notó un envejecimiento prematuro de estas baterías, dadas las condiciones de humedad extrema en estas localidades las baterías del tipo Plomo – Acido son las más ventajosas en su uso.

Las experiencias mostradas evidencian claramente que hacia el año 2006 fecha en la que se hizo la evaluación de los sistemas, se concluyeron que la falta de normas técnicas específicas para nuestra realidad han contribuido a registrar las fallas en estos sistemas SFD, pues a esa fecha no había norma técnica adecuada que permita una buena adquisición de los sistemas.

La otra parte importante del sistema es la sostenibilidad de la misma, para eso se han ensayado la creación de comités de electrificación que supuestamente estaban previstos para velar por la continuidad del servicio, ellos son los encargados de cobrar el servicio simbólico (10 nuevos soles mensuales), sin embargo debido a múltiples razones y aduciendo la no confiabilidad del sistema entregado mucho de los usuarios no han cumplido con los pagos por lo tanto la morosidad detectada en estos sistemas son altos y más aún si se sabe que pese a que las tarifas son más bajas que la indicada es decir que estas bordean inclusive los 4 soles mensuales, aun así la morosidad sigue siendo muy alta, factor que debe ser resuelto cuando se aplique estos sistemas en zonas aisladas.

El Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI) ha ejecutado desde 1996 un proyecto piloto de electrificación fotovoltaica en la comunidad insular de Taquile en el Lago Titicaca, en el marco de este proyecto se ha instalado 427 SFD, todos funcionando hasta la fecha.

Como se podrá apreciar la experiencia del uso de sistemas fotovoltaicos en el Perú básicamente está centrado en pequeños sistemas entre 50 Wp a 70 Wp destinados a la electrificación rural para alimentar a cargas de alumbrado y alguna alimentación de artefactos eléctricos de bajo consumo.

Le evaluación realizada por la empresa ADINELSA de sus proyectos de SFD concluyen que el costo de la energía generada es de 0,911 US\$/kWh (Año 2005),

⁹⁹ Electrificación Rural a Base de Energía Fotovoltaica en el Perú – Recopilación de antecedentes y experiencias nacionales en electrificación Rural Fotovoltaico elaborado por el departamento de proyectos de Naciones Unidas – Peru y GEF , Agosto , 2006

valor muy alto comparado con la tarifa social que es del orden de los 0,068 US\$/kWh para rango de consumos menores (0-30 kWh/mes), por lo que esto es una barrera muy grande para dar sostenibilidad a los proyectos de SFD y recupero de la inversión. Toda vez que estos sistemas están destinados a sectores de muy bajos ingresos económicos que viven en zonas remotas de nuestro país, por tanto, para que se revierta esta situación el estado debe contar con una política adecuada en el marco del desarrollo sostenible en el tema de la electrificación rural, previendo por ejemplo las liberaciones de impuestos de importación, no cobro del IGV y subsidios cruzados a fin de que estos sistemas cumplan su cometido social.

Según información recabada de un estudio realizado por Osinergmin "Diagnostico de la Problemática de la Electrificación Rural en el Perú" – año 2010, se menciona que al año 2005 existían alrededor de 10000 SFV instalados con una potencia de 1,5 MWp, de los cuales el 65 % se emplean en telecomunicaciones y el 35 % para alimentar a sistemas domiciliarios, incluyendo postas médicas, salas comunales y otras cargas rurales importantes.

Teniendo en cuenta estas experiencias, el estado ha lanzado en el presente año 2014 un concurso público que fue conducido por OSINERGMIN con la finalidad de adjudicar (7.11.2014) por un plazo de 15 años la prestación del servicio de electricidad con Recursos Energéticos Renovables hasta 500.000 usuarios ubicados en las zonas rurales y aisladas del Perú (Áreas no conectadas a Red), siendo las instalaciones requeridas en este concurso los sistemas fotovoltaicos, mediante la cual se comprometen a invertir, implementar y operar los sistemas SFD y que al término del plazo de vigencia las instalaciones pasarían a manos del estado. El estado remunerará al inversionista con fondos de un fideicomiso consignados para este fin en la normativa vigente. Los sistemas domiciliarios licitados corresponden a sistemas de 85 Wp para los sistemas domiciliarios y que manejarán 12 Vcc, así mismo se han incluido sistemas para alimentar a cargas especiales como Postas Médicas de 425 Wp y colegios 850 Wp según evaluación particular en cada caso, siendo estas las potencias mínimas exigidas.

Desarrollo de Sistemas Híbridos

De acuerdo a la investigación realizada, en el Perú en el año 2001 se implementó un proyecto híbrido Solar – Diesel en la localidad de Padre Cocha, distrito de Puchanga, Iquitos, este proyecto denominado RAPS (Remote Área Power Supply) fue implementado por ILZRO, organización dedicada a la investigación de usos de plomo

y zinc (institución privada), el proyecto consistía en un sistema fotovoltaico de 40 kWp, con un sistema de baterías y con un grupo electrógeno de 135 kW.

El proyecto se realizó pero su operación tuvo una serie de problemas técnicos y financieros que hicieron fracasar el proyecto, porque su sostenimiento no fue posible con los ingresos recaudados por la prestación del servicio y porque no se cumplió una serie de condiciones de eficiencia en la administración del proyecto.

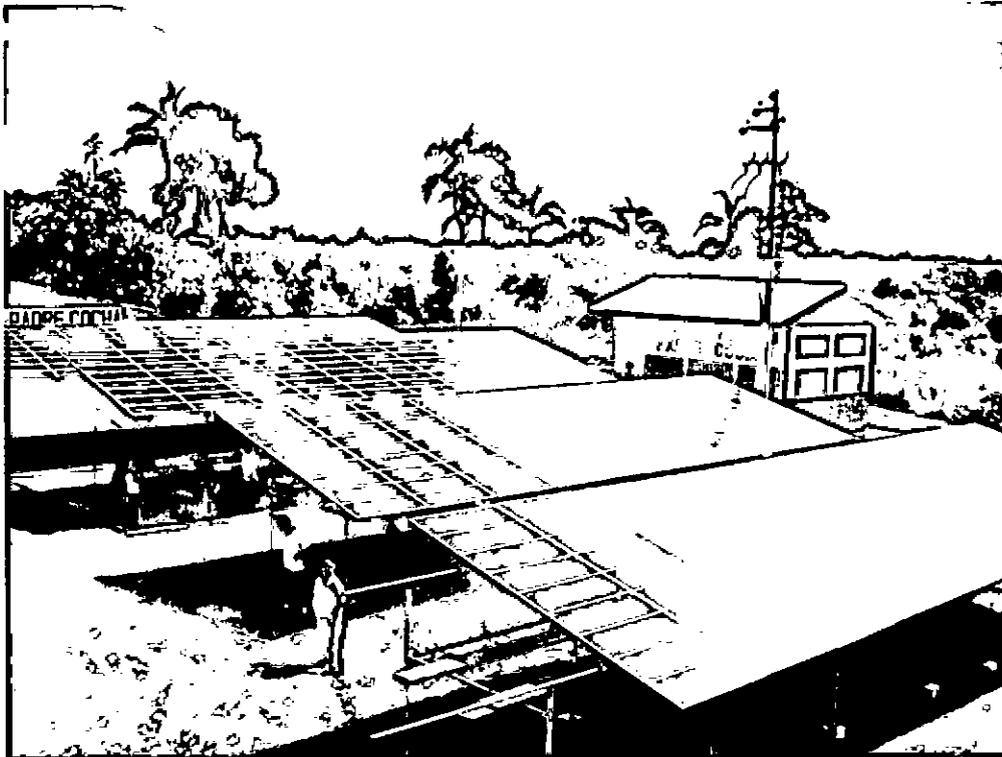


Fig. N° 4.3: Sistema híbrido Solar fotovoltaico y Diesel instalado en la localidad Padre Cocha.

También se implementó en el año 2008, 20 sistemas híbridos Solar fotovoltaicos conformado de un aerogenerador de 100 W y un módulo fotovoltaico de 50 Wp, beneficiando a 100 pobladores del centro poblado Campo Alegre, en el distrito de Namora, provincia de Cajamarca, región de Cajamarca.

Sistema Híbrido “Eurosolar”

Es un programa impulsado por la Comunidad Europea, a través del convenio de financiación firmado en diciembre del 2006 entre la Oficina de Cooperación Europea, AID y los ocho países más pobres de Latinoamérica, para implementar un programa de promoción de energías renovables mediante sistemas híbridos con altos

componentes fotovoltaicos que ayuden a mejorar las condiciones de vida de las comunidades rurales. Se ha previsto la instalación de 130 sistemas.

El programa Eurosolar, ha consistido en la instalación en cada comunidad beneficiada de 5 computadoras portátiles, un equipo multifuncional (impresora y escáner), un proyector, equipos para permitir acceso a internet vía satelital y telefonía de viva voz, así como de un purificador de agua, una nevera y un cargador de baterías. En cada caso, se ha utilizado la energía renovable disponible en el lugar.

El proyecto consta de un panel solar de 1000 Wp y un aerogenerador de 400 W para alimentar a las cargas anteriormente descritas.

Sistema Fotovoltaico Productivo

Otro de los proyectos implementados corresponde a un sistema fotovoltaico de 2 kWp que suministrará energía eléctrica con generación máxima estimada de 12 kWh/día a 220 Vca, para la operación de esquiladora, hiladoras, remalladoras y máquinas de coser para un taller comunal ubicado en la zona de Vilcabambas – Puno.

Sistemas Fotovoltaicos Conectados a RED

El estado peruano a partir del año 2008 está utilizando la modalidad de subastas para promocionar las inversiones en sistemas de generación con energías renovables, ha logrado una gran acogida entre los inversionistas nacionales y extranjeros, habiendo conducido ya tres subastas cuyo resumen en potencia instalada a la fecha se muestra en el cuadro siguiente:

Cuadro 4.2: Proyectos adjudicados en las Tres subastas RER

Proyectos adjudicados	Fecha de operación	MW	Inversión (Millón US\$)
40 pequeñas hidroeléctricas	2012 / 2016	391	550
4 plantas eólicas	2012 / 2014	232	720
5 plantas Solar PV	2012 / 2014	96	390
1 Planta de Biomasa	2010	23	9
2 Plantas de Biogás	2011 / 2014	4	13
Total : 52 Proyectos		476	1682

Fuente: *Presentación Riquel Mitma 3ra Conferencia de Energías Renovables Set-2014*

De ellas se desprende que hay 4 plantas fotovoltaicas actualmente operando con una potencia de 20 MWp cada uno y una planta de 16 MWp la cual está en proceso de construcción con la cual dan los 96 MWp de potencia instalada total que están conectados al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional, cabe indicar que todas ellas están instaladas en el Sur del País, lugar donde los niveles de radiación son mayores en el Perú.

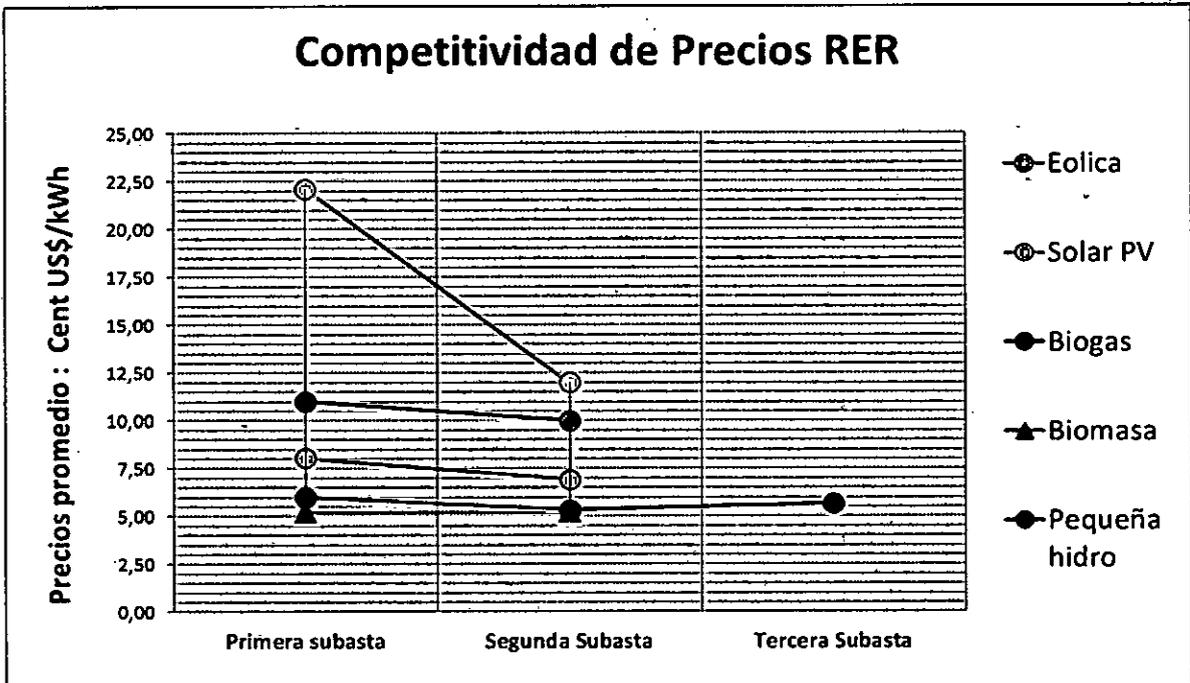


Fig. N° 4.4: Precios Subastas RER

Fuente: Presentación Riquel Mitma 3ra Conferencia de Energías Renovables Set-2014

En la Fig. 4.4 se puede apreciar que de los costos ofertados para cada tecnología, la solar es la más cara, sin embargo la disminución entre el costo unitario ofertado en la primera subasta RER con respecto a la solar llama mucho la atención pues en la segunda subasta han ofertado con un costo de casi el 50% del costo inicialmente ofertado, por lo tanto se ve claramente que la tendencia es al sinceramiento de los costos en las tecnologías RER, sin embargo esta tecnología todavía sigue siendo cara por ejemplo con respecto a las tecnologías de biogás, eólica y de las pequeñas centrales hidroeléctricas.

4.1.3 Mercado Eléctrico Aislado

El estado ya está atendiendo a los usuarios que no cuentan con ninguna fuentes de energía eléctrica, aquí la energía solar fotovoltaica juega un papel importante, pues otra alternativa es mucho más costosa, debido a la dispersión de las cargas a alimentar y sobre todo a su lejanía de las redes eléctricas existentes, la prueba de ello es que recientemente se han subastado cerca de 500,000 paneles fotovoltaicas para alimentar principalmente cargas domésticas, y que recogen mejoras en cuanto a la gestión de estos sistemas, en la cual el estado garantiza la sostenibilidad de las mismas cubriendo la diferencia de los costos a través de subsidios cruzados.

a) Localidades rurales con suministro eléctrico con fuentes de suministro con petróleo diesel

Entonces, que nicho de mercado queda para el desarrollo de las energías renovables, pregunta que podemos responder, que todavía en el Perú existen sistemas eléctricos cuya confiabilidad y sobre todo los costos de generación son demasiado altos, principalmente aquellas zonas donde la principal fuente es la derivada del petróleo Diesel 2, es decir que en estas zonas donde ya existen grupos térmicos que alimentan la demanda eléctrica y que tienen problemas para cubrir la demanda eléctrica, debido a múltiples razones como por ejemplo la logística para llevar el combustible, que siendo un lugar alejado, a veces sin caminos de acceso, el transporte marca la diferencia y por lo tanto los costos de generación pueden ser bastante onerosos y si a esto sumamos que nuestro país es un importador neto de combustibles, siempre estaremos propensos a los vaivenes del precio de petróleo a nivel internacional y tercero que la tendencia actual es utilizar energías limpias no contaminantes y que por lo tanto el mercado de las energías renovables en estos sectores son una realidad que se debe explorar, sobre todo la energía solar térmica y fotovoltaica y la eólica respectivamente.

Lo mencionado anteriormente esta corroborado en un estudio que ha elaborado la gerencia de fiscalización eléctrica de Osinergmin, en su estudio Diagnóstico de la Problemática de la Electrificación en el Perú – Año 2010, el cual fue descrito con detalle en el ítem 1,2 del presente documento

b) Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica en el ámbito nacional

Educación rural

El mejoramiento de la calidad educativa en el ámbito nacional debe ser una política de estado, especialmente en zonas rurales en la cual la calidad educativa se ve mermada por múltiples razones las cuales no serán analizadas en este estudio, sino lo que se pretende es plantear una solución viable adecuada a través de módulos de suministro de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos, dándoles una alternativa para que a través de ella puedan contar con suministro eléctrico para cargas como para el uso de computadoras y medios de comunicación, el planteamiento obedece primero que las cargas a alimentar son muy pequeñas (por ejemplo una lap top tienen el siguiente requerimiento 20 Vcc y 3,25 A), y su uso es compatible con las horas de sol durante el día, sin embargo hay posibilidad de contar con un sistema de almacenamiento de energía a través de baterías solares para cargas a alimentar en horas nocturnas si la situación lo a merita.

Aquí se plantea un módulo integrado por 10 lap tops y un sistema de comunicación para contar con internet.

Salud rural

Otro tema por resolver es la salud poblacional, que al igual que el sistema educativo está muy deteriorada y que si inclusión es necesaria, aquí las cargas corresponderán a un equipo de refrigeración para guardar vacunas para combatir males endémicos cuando se presenten, la otra carga podrá ser el sistema de alumbrado, cargas que si se combinan con sistemas de alumbrado de última tecnología (LEDS), cuyos consumos de energía son muy pequeños comparados con los focos ahorradores de amplia aplicación actualmente.

Usos productivos zonas rurales

El conocimiento de que muchas zonas rurales cuentan con posibilidades de desarrollo , cuentan con recursos capaces de generarles ingresos adicionales que mejorarían su calidad de vida, dado el conocimiento de la problemática por ejemplo en localidades rurales existen zonas de cultivo que están a una mayor altura que fuentes de agua (

ríos y manantiales), aquí la alternativa de uso de sistemas de bombeo que utilicen fuentes voltaicas como alternativa para bombeo de agua a zonas de almacenamiento para su posterior uso usando tecnologías de riego adecuadas (Riego por goteo) pueden dar oportunidades de negocio al ampliar varias cosechas al año en lugar de uno , la cual es común en estos lugares , pues solo se utilizan las lluvias naturales a cual solo tienen una época en el año.

Aun en lugares donde cuentan la energía eléctrica, la posibilidad de utilizar los paneles fotovoltaicos debe ser evaluado, ojo que este sistema puede obviar la utilización de baterías como fuentes de almacenamiento, así de esta manera disminuir los costos de inversión inicial , las ventajas son que los costos de operación en mantenimiento son mínimos por no decir casi nulos, su utilización se coloca en el lugar de necesidad, contra por ejemplo la instalación de una línea primaria en media tensión, generalmente en nuestro medio 22,9 kV, transformador 22,9 / 0,23 kV, y los costos de la energía por el uso del sistema de bombeo la cual debe ser pagada en forma mensual a la empresa de distribución.

Otra aplicación, podría ser la implementación de sistemas de refrigeración para productos lácteos para la conservación de estos productos.

Las aplicaciones de estos sistemas fotovoltaicos no tienen ninguna restricción, especialmente en sistemas de bajos consumos y su aplicación está en todos los campos que la imaginación permita.

4.1.4 Normativa vigente o aplicable

a) Normativa Nacional

En esta parte de la tesis se va a analizar toda la normatividad referente a la aplicación las energías renovables no convencionales para la generación de la energía eléctrica en el Perú, sus especificaciones técnicas, las normas que regulan en el país el desarrollo y la implementación de la energía fotovoltaica para la generación de energía eléctrica.

Cabe indicar que mucho antes de se diera la Ley de Concesiones Eléctricas, siempre ha sido de interés para el estado peruano, el desarrollo de las energías renovables no convencionales, prueba de ello a través de instituciones como la ex ITINTEC se

comenzó a investigar y a generar desarrollo en la energía eólica, solar y las micro centrales hidroeléctricas, a esto se unieron las universidades nacionales como la Universidad Nacional de Ingeniería y la Pontificia Universidad Católica del Perú y por supuesto Electroperú SA quien en su momento era la empresa que se encargaba del planeamiento, Ingeniería, construcción y operación del sistema eléctrico a nivel nacional.

El estado ha implementado una serie de leyes y normas que de alguna manera han promovido el desarrollo y la implementación de las fuentes de energía limpia en el sector eléctrico, tanto para el Sistema Interconectado Nacional (SEIN) y para electrificar localidades aisladas no conectadas a la red eléctrica.

Ley de Concesiones Eléctricas y su Reglamento (1993 - 1994)

Ley marco del sector eléctrico del Perú, esta ley crea el mercado eléctrico y establece su arreglo institucional.

Promueve el Uso Eficiente de la Energía (UEE) para asegurar el suministro de energía, proteger al consumidor, fomentar la competitividad de la economía nacional y reducir el impacto ambiental del uso y consumo de los energéticos.

Ley de Electrificación Rural y de localidades Aisladas y de Frontera, Ley N° 27744 (2002) – Derogada

El objetivo de la ley era de contribuir al desarrollo socio económico de las localidades aisladas y de frontera del país de manera sostenida fomentando el aprovechamiento de fuentes de energía limpia y renovables, declarando de interés nacional el desarrollo de los recursos energéticos de origen solar, eólico, geotérmico, hidráulico y biomasa y su empleo preferente en zonas rurales, localidades aisladas y de frontera.

Ley de promoción y utilización de recursos energéticos renovables no convencionales en zonas rurales aisladas y de frontera del país, Ley N° 28546 (2005)

Esta ley tiene por objeto la promoción del uso de energías renovables no convencionales para fines de electrificación de las zonas rurales aisladas y de frontera.

Ley para asegurar el desarrollo eficiente de Generación Eléctrica, DL N° 28832 (2006)

Perfecciona la ley de concesiones eléctricas, promueve licitaciones y contratos de largo plazo como medio para respaldar inversión en generación a gran escala (grandes hidroeléctricas y otras tecnologías convencionales), El ministerio de Energía y Minas se compromete a implementar la evaluación del potencial nacional de proyectos hidroeléctricos y de fuentes no convencionales de energía, auspiciando los producidos con energías renovables, además promueve la generación distribuida.

Ley General de Electrificación Rural, Ley N° 28749 y su reglamento (2006 - 2007)

Establece el marco normativo para la promoción y desarrollo eficiente y sostenible de la electrificación rural de las localidades asiladas y de frontera del país, dando prioridad al aprovechamiento y desarrollo de los recursos energéticos renovables de origen solar, eólico, geotérmico, hidráulico y biomasa existente en el territorio nacional.

Reglamento Técnico: Especificaciones y procedimientos de evaluación del sistema fotovoltaico y sus componentes para electrificación rural (2007), Resolución Directoral N° 003-2007-EM/DGE

Este Reglamento Técnico establece las especificaciones técnicas y los procedimientos de evaluación que debe cumplir el Sistema Fovoltaico (SFV) y sus componentes para sistemas hasta 2000 Wp

Las Especificaciones técnicas del Reglamento Técnico describen las características mínimas que deben cumplir el SFV y sus componentes, así como los procedimientos para verificar el cumplimiento de éstos.

Reglamento de la Ley 27345 (D.S. N° 053-2007/EM) (2007)

Reglamenta la ley con una serie de acciones desde la capacitación, elaboración de planes referenciales de uso eficiente de la energía hasta la elaboración de indicadores de evaluación que permitan fomentar una cultura al uso eficiente de la energía.

Ley de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables - Decreto Legislativo N° 1002 (D.L. N° 1002), (mayo 2008)

Esta ley de promoción, declara de interés nacional y necesidad pública el desarrollo de la generación de electricidad mediante recursos renovables y define como energías renovables no convencionales a la Solar Fovoltaico, Solar Térmico, Eólico, Geotérmico, Biomasa e Hidroeléctrico sólo hasta 20 MW.

Establece las bases para que las Energías Renovables participen en la Matriz de Generación Eléctrica, indica que el MINEM establecerá cada 5 años un porcentaje objetivo en que debe participar, en el consumo nacional de electricidad, la electricidad generada a partir de Recursos Energéticos Renovables (RER), tal porcentaje objetivo será hasta 5% anual durante el primer quinquenio.

Con respecto a la comercialización de energía y potencia generada con Energía Renovable, tiene prioridad en despacho (se le considera con costo variable de producción igual a cero), primas preferenciales en subastas (recargadas al peaje de transmisión), prioridad en conexión a redes, además de fondos para investigación y desarrollo.

Reglamento de la Ley de Promoción de la Inversión de la generación de electricidad con energías renovables - D.S. N° 012-2011 EM, con fecha 23/03/2011, se aprobó el reglamento de la generación de electricidad con energías renovables.

El Reglamento tiene por objeto establecer las disposiciones reglamentarias necesarias para la adecuada aplicación de la Ley a fin de promover el desarrollo de actividades de producción de energía eléctrica a base del aprovechamiento de RER.

Bases Consolidadas de la primera Subasta con Recursos Energéticos Renovables (RER), aprobadas mediante Resolución Viceministerial N° 113-2009-MEM/VME del Ministerio de Energía y Minas.

Bases Consolidadas de la segunda Subasta con Recursos Energéticos Renovables (RER), aprobadas mediante Resolución Viceministerial N° 036-2011-MEM/VME del Ministerio de Energía y Minas.

D.S. N° 020-2013-EM, con fecha 27/06/2013, aprobó el reglamento para la promoción de la Inversión eléctrica en áreas no conectadas a red.

Plan maestro de Electrificación Rural con energía renovable en la república del Perú elaborado por la agencia de Cooperación Internacional del Japón - Electric Power Development Co. Ltd. Nippon Koei Co, Ltd. - año 2008

Plantea un plan a largo plazo hasta el 2020 para la electrificación con energías renovables, específicamente se plantea la electrificación de 10.829 localidades (261.520 viviendas) a ser electrificadas con paneles solares fotovoltaicos, así como implementación de micro centrales hidroeléctricas en 519 localidades (18.498 viviendas), previendo una inversión de 178 millones de dólares para las PV y de 39 millones de US\$ para las micro hidroeléctricas.

Como puede verse, no existen normas específicas que normen los diseños, pruebas, materiales y recomendaciones para la instalación de un sistema fotovoltaico en nuestro país, con excepción del reglamento técnico que especifican de una manera general las características técnicas que debe cumplir los sistemas fotovoltaicos para electrificación rural en el Perú.

Resolución OSINERGMIN N° 206-2010-OS/CD : Fija la Tarifa Eléctrica Rural para Sistemas Fotovoltaicos, expresada en Cargos Fijos Equivalentes por Energía Promedio (12/08/2010)

Resolución Ministerial N° 523-2010-MEM/DM : Fijan el factor de adecuación del FOSE de los Sistemas aislados, Sectores Urbano – Rural y Rural aplicables a los usuarios de ser atendidos con SFV del 02/12/2010

b) Normativa Internacional

Dado el desarrollo alcanzado en este tipo de tecnologías países europeos han desarrollado normas específicas para cada componente de un sistema fotovoltaico, como por ejemplo España ha desarrollado a través de AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación, sólo para muestra se citarán algunas normas con la finalidad de dar a conocer el avance logrado en estos países:

UNE 206001 – 1997, EX – Módulos Fotovoltaicos – Criterios Ecológicos.

UNE EN 50380 – 2003, Informaciones de las hojas de datos y de las placas de las características para los módulos fotovoltaicos.

UNE EN 50461 – 2007, Células Solares – Información de la documentación técnica y de datos del producto para células solares de silicio cristalino.

UNE EN 60891 – 1994, Procedimiento de corrección con la temperatura y la irradiancia de la característica V - I de dispositivos fotovoltaicos de silicio cristalino.

UNE EN 60904 – 1 – 1994, Dispositivos Fotovoltaicos – Parte 1 : Medida de la característica intensidad – tensión de los módulos fotovoltaicos.

UNE EN 60904 – 2 – 1994 : Dispositivos Fotovoltaicos – Parte 2 : Requisitos de células solares de referencia.

UNE EN 60904 – 10 – 1994 : Dispositivos Fotovoltaicos – Parte 10 : Métodos de medida de la linealidad.

UNE EN 61427.2002 : Acumuladores para sistemas de conversión fotovoltaica de energía solar, Requisitos generales y métodos de ensayo.

UNE EN 61646 – 1997 : Módulos Fotovoltaicos (FV) de lámina delgada para aplicación terrestre. Calificación del diseño y aprobación del tipo.

Cabe indicar que muchas de estas normas son adoptadas de otras normas internacionales como las normas IEC International Electrotechnical Commission como por ejemplo la Norma UNE EN 60904 – 7 : 1999, es la adoptada de la norma IEC 60904 – Edición 1 Dispositivos Fotovoltaicos – Parte 7 : Cálculo de la corrección del desajuste espectral para las mediciones de dispositivos fotovoltaicos, cuya edición vigente es la tercera y actualmente está en proceso de corrección para la cuarta versión.

A modo de muestra podemos citar algunas normas IEC y cuyo detalle se muestra en anexo del presente documento.

CEI 60904 10 - 1998 : Dispositivos Fotovoltaicos - Parte 10 : Método de medida de la linealidad.

CEI 60904 – 2 : 1989 : Dispositivos Fotovoltaicos – Parte 2 : Requisitos de células solares de referencia.

CEI 60904 – 2:1989/A1:1998 : Dispositivos Fotovoltaicos – Parte 2 : Requisitos de células solares de referencia.

CEI 60904 – 3 : 1989 : Dispositivos Fotovoltaicos – Parte 3 : Fundamentos de medida de dispositivos solares fotovoltaicos (FV) de uso terrestre con datos de irradiancia espectral de referencia.

CEI 62124 : 2004 : Equipos Fotovoltaicos (FV) autónomos . Verificación de diseño.

Normas DIN (Normas Alemanas)

DIN EN 61727 : Sistemas Fotovoltaicos : Consejos y directrices : Condiciones Técnicas de Conexión.

DIN EN 61701: 2000 – 08 : Ensayos de corrosión por niebla salina de módulos fotovoltaicos.

VDE 0126 : Punto de desconexión automática para plantás fotovoltaicas.

Lo descrito es una muestra de que existen normas internacionales que norman las especificaciones técnicas del proceso de fabricación, características de los módulos fotovoltaicos, procesos de prueba, condiciones de montaje, pruebas de funcionamiento, etc. que han sido desarrolladas a fin de normalizar los sistemas fotovoltaicos y sus componentes adicionales como los acumuladores, inversores, cables de conexión, etc.

c) Incentivos para la inversión

El estado peruano ha dictado diversas normas que están promoviendo la inversión de la generación de electricidad con energías renovables como por ejemplo el DL 1002 – mayo 2008 y su Reglamento DS N° 012-2011-EM los cuales han servido para concretar las recientes inversiones de sistemas de generación eólicos, solares fotovoltaicos, Biomasa y pequeñas plantas hidroeléctricas (< 20 MW), los cuales han permitido la implementación de 96 MWp en sistemas solares (5 centrales fotovoltaicas) actualmente operando en el sur del país y todos ellos directamente conectados al Sistema Interconectado Nacional.

Los incentivos se basan en que ellos fijan su tarifa a la que pueden vender al sistema nacional y tienen prioridad en el despacho.

Bajo esta modalidad también se ha adjudicado la última convocatoria para implementación de 500.000 sistemas fotovoltaicos destinados a la electrificación rural para cargas no conectadas a red.

Mecanismos de desarrollo limpio

Existe a nivel internacional un mecanismo de desarrollo limpio (MDL) dentro del mercado regulado de carbono y además existe un mecanismo voluntario del Carbono (MVC) que generan beneficios a través de la comercialización de los Certificados de las Reducciones de Emisiones (CRE) en el MDL o de las reducciones de Emisiones Verificadas (VER) en el caso de MVC.

Fondo de Inclusión Social Energético (FISE)

El estado peruano está promoviendo un Plan de Acceso Universal a la Energía aprobado por el Ministerio de Energía y Minas RM N° 203-2013-MEM/DM, cuyos proyectos serán implementados con los recursos del FISE (creado mediante ley N° 29852) y de otras fuentes económicas como transferencias del Sector Público, fuentes de financiamiento externo. Recursos a través de convenios, recursos considerados en el Plan Nacional de Electrificación Rural 2013-2022

Siendo los fines del FISE lo siguiente:

- La masificación del uso del gas natural (residencial y vehicular) en los sectores vulnerables.
- Compensación para el desarrollo de nuevos suministros en la frontera energética, como módulos fotovoltaicos, paneles solares térmicos, biodigestores, etc. focalizándose en las poblaciones más vulnerables.
- Compensación social y promoción para el acceso al GLP de los sectores vulnerables urbanos y rurales.

Fondo de compensación Eléctrico (FOSE)

Creado por el estado peruano para compensar el consumo de electricidad del sector doméstico para aquellas personas de bajos ingresos y cuyos consumos son menores a los 100 kwh/mes dentro de la opción tarifaria BT5.

Este fondo se financiará con un recargo en las tarifas a todos los usuarios cuyos consumos sean mayores de 100 kwh/mes, conocido como subsidio cruzado.

4.2 Diseño de la Investigación

En el punto anterior se presentó la evolución de esta tecnología en el mundo, mostrando la influencia directa en la cobertura de la demanda de energía y explicando las razones económicas y ambientales y sobre todo las políticas de estado que han permitido su desarrollo inclusive en zonas de baja radiación como es el caso de Alemania, habiendo avanzado mucho en el desarrollo de esta tecnología.

Por otro lado se presentó las experiencias en el Perú, en muchos casos no muy exitosas, donde a pesar que las soluciones tenían buena intención, la inexperiencia en el manejo de estos sistemas, la falta de un adecuado plan de gestión hicieron fracasar estos proyectos, la falta de normas específicas e incentivos que el estado debió implementar en su momento han originado un lento crecimiento en el desarrollo de los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo el estado ha presentado tíbiamente modelos de incentivos, como limitaciones impuestas para el desarrollo adecuado de estos sistemas y en general de las energías renovables no convencionales, los cuales han permitido contar ya en nuestro sistema SEIN el aporte de centrales fotovoltaicas de 96 MW , así como de centrales Eólicas y otras no convencionales.

El diseño de la investigación está basado en el efecto económico directo que puede ocasionar el implementar un sistema fotovoltaico en un sistema que cuenta ya con generación térmica y cuyo suministro se ve restringido específicamente por los altos costos de generación, planteando soluciones parciales para alimentar a cargas aisladas como centros educativos, postas médicas u otras cargas comunitarias, cuyas cargas son relativamente pequeñas y adecuadas para estas tecnologías, ayudando de esta manera a mejorar la calidad de vida de la población ya que se contara con servicios que no se cuentan hoy en día o se cuentan con restricciones influido por la falta de suministro eléctrico.

Se analizará también la mejor solución complementaria adecuada a cada caso, es decir el mejor esquema solar fotovoltaica – térmico, basado en un análisis económico detallado para cada caso, las necesidades de otorgar subsidios en el caso de la inversión generación, así como la aplicación de los subsidios que el sector eléctrico otorga a aquellos usuarios que tienen consumos menores de 30 kwh/mes.

4.2.1 CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

La metodología de cálculo para el dimensionamiento de una instalación fotovoltaica dependerá básicamente si la instalación trabajara en forma aislada o si la instalación trabajara en paralelo con la red eléctrica existente, la diferencia básica se encuentra en la determinación del sistema de almacenamiento necesario en una instalación aislada para periodos de baja producción o consumos mayores a los previstos.

En general el método estará basado en el siguiente procedimiento:

- Determinación de las cargas energéticas previstas a ser alimentadas
- Determinación de la cantidad de energía incidente disponible en la ubicación de la instalación
- Determinación de las pérdidas por efecto de la orientación de los paneles solares
- Determinación de la potencia mínima necesaria para asegurar el abastecimiento energético
- Determinación de la energía incidente en el plano de captación de los módulos solares
- Determinación de la potencia en función de los valores comerciales de los módulos solares
- Configuración del sistema
- Determinación del almacenamiento necesario para asegurar una autonomía frente a periodos de baja producción o consumos mayores a los previstos.

a) Determinación del Consumo de energía de la instalación

Como paso inicial se debe necesariamente determinar el consumo de energía de las cargas a ser alimentadas por el sistema fotovoltaico para lo cual se debe conocer lo siguiente:

- Potencia de cada carga a alimentar
- Horas de utilización de cada carga

Para el caso que nos ocupa, las cargas de las computadoras y los sistemas de comunicación deben ser tomadas de las características técnicas de los equipos, los cuales normalmente están descritas en la placa de datos de cada equipo, en el caso que no los hubiere se puede estimar las cargas en base a valores normalizados disponibles de varias fuentes conocidas.

Con respecto a las horas de utilización, estas deben ser definidas por el usuario, sin embargo en algunas ocasiones será necesario conocer el ciclo de funcionamiento de cada carga, como por ejemplo las cargas de los sistemas de comunicación que requieren mucha más energía cuando funcionan en transmisión, lo que ocurre algunos minutos al día, mientras en el resto del tiempo requieren un pequeño consumo de mantenimiento.

b) Tipos de Carga

En general un sistema puede alimentar a dos tipos de carga, unas cargas de corriente continua y a otras cargas de corriente alterna

Cargas en corriente continua.

Normalmente las cargas en corriente continua se utilizan para alimentar en tensiones de 12 o 24 Vcc, las cuales generalmente son los aparatos de alumbrado y algunas cargas de mando eléctricos en corriente continua para algunos sistemas de control.

Para nuestro caso no habrá cargas en corriente continua.

Cargas en Corriente Alterna

Las cargas de corriente alterna son cargas principales y de mayor consumo, entonces serán estas las que deberán ser identificadas correctamente, para nuestro caso se suscribirá a alimentar a los ordenadores (Computadoras) y al equipo de comunicación cuyos consumos y potencias se muestran en el cuadro siguiente:

Cuadro N° 4.3 : Consumo de energía para ordenadores y sistemas de comunicación

Aparato	Cantidad	Horas de uso al día	Potencia del aparato en W	Total del consumo de energía en Wh/día
Ordenadores	10	5	200	10000
Equipo de comunicación	1	5	50	250
			Total	10250

c) Determinación de la cantidad de energía incidente disponible en el lugar de la instalación

El dimensionamiento de la instalación adecuada debe obedecer a una serie de cuestionamientos que permitan un diseño que pueda responder a estas preguntas, es decir que su diseño satisfaga una serie de condiciones como por ejemplo, que pasa si la cantidad de radiación solar baja significativamente en una época determinada de año y tengamos un consumo tope podrá el sistema planteado atender a esta demanda, que pasa si la demanda de energía se requiere fuera de horas de sol, etc. por lo tanto el dimensionamiento del generador se debe realizar en función de:

- Periodo estacional en el que se efectúa un mayor consumo
- Nivel mínimo de radiación disponible

Por lo tanto se debe indicar cuál es el periodo para el que se realizará el diseño y los motivos de la elección, estas deberán obedecer a las consideraciones planteadas anteriormente.

Esta matriz de oferta, es decir la radiación diaria media mensual (Kwh/m2.dia), puede ser calculado de las diferentes tablas proporcionadas por los distintos organismos, como lo indicado por el Atlas Solar del Perú ⁽¹⁰⁾ por ejemplo, podemos recoger la información del siguiente centro poblado que solo cuenta con generación térmica restringida por horas en la zona de selva baja.

¹⁰ Atlas de Energía Solar del Perú Elaborado por SENAMHI en el año 2003

Cuadro N° 4.4 : Datos del proyecto piloto para evaluación de un sistema fotovoltaico.

Ítem	DESCRIPCIÓN	VALOR O DATO RELEVANTE
1	Departamento	Loreto
2	Provincia	Alto Amazonas
3	Distrito	Yurimaguas
4	Localidad	Santa Maria
5	Potencia Instalada	60 kW
6	Número de grupos	1
7	Horas de funcionamiento por día	2
8	Año de puesta en Servicio	1999
9	Habitantes	1200
10	N° de usuarios	110
11	Costo de combustible	14 soles /galón
12*	Radiación solar diaria mes de febrero	4,5 . 5,0 kwh/m2
	Radiación solar diaria mes de agosto	4,5 . 5,0 kwh/m2
	Radiación solar diaria mes de mayo	4,5 . 5,0 kwh/m2
	Radiación solar diaria mes de noviembre	5,0 - 5,5 kwh/m2

Fuente : Información proporcionada por OSINERGMIN sobre localidades aisladas con servicio eléctrico

*Atlas de Energía solar del Perú –Senamhi – Enero del 2003

Dimensionamiento del Generador fotovoltaico

La potencia mínima que debe instalarse en módulos FV está dada por la siguiente expresión:

$$P_{min} = E_d \cdot F_U \cdot G_{CEM} / (G \cdot F_s \cdot \eta_g)$$

Donde:

P_{min} = Es la potencia mínima del generador para un día tipo determinado

E_d = La demanda diaria en energía en kWh

F_U = Factor de utilización de la instalación

G_{CEM} = Radiación normalizada a condiciones estándares 1 kW/m²

G = La radiación diaria condiciones de trabajo del día considerado kWh/m²

F_s = El factor de sombra
 η_g = Rendimiento Global de la instalación

Factor de utilización tienen en cuenta el número de días a la semana durante las cuales se utiliza la instalación y viene dada por:

$$F_U = D_U / 7$$

Donde D_U es el número de días a la semana que se utiliza la instalación

La irradiación diaria en las condiciones de trabajo se calcula mediante la ecuación:

$$G = G_{OP} \cdot F_i$$

G_{OP} = es la irradiación para la orientación e inclinación óptimas

F_i = el factor de corrección en función de la orientación

La irradiación óptimas puede encontrarse en tablas meteorológicas (Atlas de Energía Solar en el Perú)

El rendimiento global de la instalación debe tener en cuenta las pérdidas en todos los elementos de la instalación y vienen dados por la expresión

$$\eta_g = (1 - p_1/100) \cdot (1 - p_2/100) \dots (1 - p_n/100)$$

donde las p_1, p_2, p_n son las pérdidas en % en las distintas partes de la instalación fotovoltaica

Según el Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía de España (IDAE) a manera de orientación nos da la siguiente tabla:¹¹

¹¹ Generación de energía solar fotovoltaica por Lluís Jtgar – Editorial Marcombo – Primera Edición, 2012 - España

Cuadro N° 4.5: Pérdidas en % por distintos conceptos para una instalación fotovoltaica

Concepto	Pérdidas en %
Temperatura del Panel	$100 - 0,35(T_c - 25)$
Polvo y suciedad	1 - 8
Dispersión de parámetros entre módulos	2
Auto descarga de las baterías (20° C)	0,5
Rendimiento de la Batería (Carga – descarga)	5 - 10
Inversor	5 - 20
Regulador	10
Cableado desde los paneles al regulador	1,5
Cableado resto de la instalación	3 – 5

La temperatura del panel puede calcularse mediante la ecuación:

$$T_c = T_{amb} + (TONC - 20) \cdot (E/800)$$

La TONC representa la temperatura que alcanzaría las células solares para un nivel de irradiancia de 800 W/m^2 , cuando la temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, velocidad del viento es de 1 m/s e incidencia normal.,

El número de Módulos que debe instalarse viene dado por:

$$N_m = \text{Parte entera de } (P_{min}/P_{n,m}) + 1$$

Donde : $P_{n,m}$ es la potencia nominal del tipo de módulo escogido

Según algunas recomendaciones técnicas por ejemplo IDAE – recomienda según el Pliego de condiciones técnicas de instalaciones aisladas de la Red que la potencia del generador fotovoltaico no debe superar en más del 20% a la potencia mínima calculada.

$$P_{gen} \leq 1,2 \cdot P_{min}$$

Para nuestro caso sería:

La irradiación del mes de febrero sobre el plano horizontal : $G_0 = 4,5 \text{ kWh}/(\text{día} \cdot \text{m}^2)$

Inclinación de los paneles $\beta = 30^\circ$

Paneles Orientados al Norte : $\alpha = 0^\circ$

Demanda de energía $E_d = 10.25 \text{ kWh}/\text{día}$

Funcionamiento 5 días a la semana

Factor de Sombra asumido = 0.95

Rendimiento global de la instalación $\eta_g = 0.65$

La radiación Óptima por día asumida = $4.5 \text{ kWh}/\text{m}^2$

La potencia mínima del generador es

$$P_{\min} = 10.25 * 0.71 * 1 / (4.5 * 0.95 * 0.65) = 2,62 \text{ kWp}$$

Para instalar un generador de 2,62 kWp se dispone de tipos de panel cuyas características se muestran en el siguiente cuadro

Cuadro N° 4.6: Características de Paneles fotovoltaicos - Cuadro Comparativo

Características en el Punto de máxima potencia	Tipo 1 : CNBM Solar Monocrystalline Series	Psolarworld Monocrystalino SW230	Psolarworld Monocrystalino SW245
Potencia (W)	120	230	245
Tensión (V)	18.4	20	20
Intensidad (A)	6.54		
Dimensiones LxAxE (mm)	1061x810x35 mm	1675x1001x34 mm	1675x1001x34 mm
Peso (kg)	12 kg		
Cociente $P_{\min}/P_{n,m}$	21.82	11.39	10.69
Numero de paneles	22	12	11
Potencia Instalada	2.64 kW	2.76	2.695
Cociente P_g/P_{\min}	1.008	1.05	1.03

Para nuestro caso se debe instalar 22 paneles, se sugiere dos paneles en serie y 11 grupos en paralelo.

4.2.2 Análisis de la incorporación de un sistema fotovoltaico en una localidad aislada que cuenta con servicio eléctrico restringido y de origen térmico.

Para el mismo caso presentado anteriormente, se realizara un análisis económico sobre la conveniencia o no de la incorporación de un sistema fotovoltaico centralizado que reemplace parte de la generación térmica existente y/o para suministrar energía eléctrica en horas donde el grupo no otorga este servicio y así obtener beneficios tangibles que linden con la calidad de vida del poblador.

Se han realizado estudios¹² donde se demuestra fehacientemente que los costos de generación de un sistema fotovoltaico es todavía el más caro que los sistemas convencionales, debido a su bajo factor de planta y costo de inversión alto. Sin embargo se ha demostrado también que para casos específicos, por ejemplo en zonas de difícil acceso (lugares alejados de las redes eléctricas) la alternativa fotovoltaica presenta ventajas económicas y ventajas medio ambientales que no han podido ser incorporadas en el análisis económico frío por su difícil cuantificación, que sin embargo pueden ser incorporados de una manera indirecta a través de incentivos que otorgan los gobiernos para el desarrollo de estas tecnologías y sobre todo da la oportunidad de contar con la energía eléctrica que es una fuente de desarrollo pues permiten mejorar la salud, educación y muchas veces proyectos de desarrollo productivo que pueden ser aprovechadas en horas donde la fuente solar está presente.

Para un sistema eléctrico aislado con generación térmica que actualmente solo da servicio solo 2 a 4 horas al día, la posibilidad de contar con energía adicional durante el día y prolongar con una buena gestión de generación las horas de funcionamiento durante la noche, da una buena oportunidad para la incorporación de un sistema fotovoltaico que complemente el suministro eléctrico durante el día cuando el sistema convencional existente no da el servicio eléctrico.

Costos de Inversión

Como primer análisis, se ha evaluado el costo de la energía para estos sistemas fotovoltaicos hasta 100 kWp, potencia compatible que puede ser instalado en estos sistemas.

¹² http://web.ing.puc.cl/power/alumnc12/costosernc/C_Foto.html

Según la bibliografía evaluada en la web, Mercados Eléctricos – IEE3372 – de junio del 2012, los costos de instalación de sistemas fotovoltaicos (Incluyen los Paneles Fotovoltaicos, los reguladores de carga, los Inversores y banco de baterías) están en el orden de 3000 a 5000 US\$/ kWp valido para pequeños sistemas FV menores a 100 kWp.

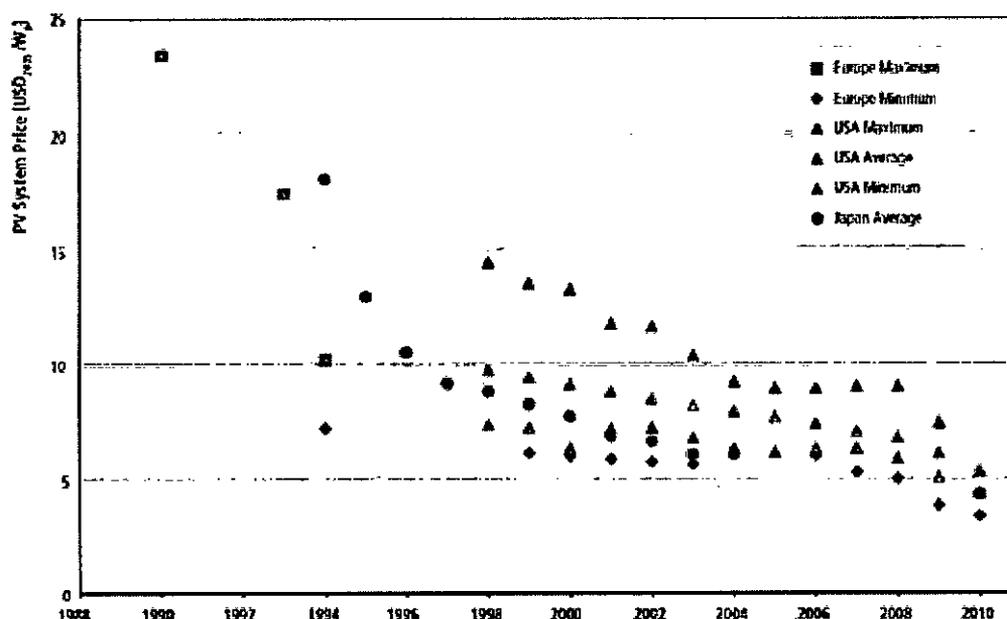


Figura 7.3.2 Costos de Instalación de pequeños sistemas FV menores a 100kW
Fuente: IPCC, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2012).

Fig. N° 4.5: Costos de Instalacion de Pequeños Sistemas FV menores a 100 kW

Para nuestro caso podemos asumir rangos de inversión que dependen del tamaño del sistema fotovoltaico, como se explico anteriormente para sistemas menores a 100 kWp son los que se muestran a continuación :

Item	Rango de Potencia (kWp)	Costo Unitario de Instalación de Sistemas FV US\$/kWp
1	10-20	5000
2	30-40	4750
3	50-60	4500
4	70-80	4250
5	90-100	4000

Fuente : IPCC – Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2012)

Para el cálculo de los costos de inversión se ha corroborado con información solicitada a principales empresas europeas como Elektra Solar Fotovoltaica empresa española especialista en suministros para sistemas solares fotovoltaicos las cuales suministran el panel fotovoltaico, los reguladores de carga, baterías o acumuladores solares, los inversores (ver anexo N° 1)

En el caso del panel fotovoltaico se ha encontrado, en la bibliografía analizada ¹³, que la evolución de los costos tienen pendiente negativa, es decir conforme la tecnología avanza y la demanda del mercado crece los costos han tenido una fuerte decremento, por ejemplo los costos de los paneles silicio cristalino estaban en el orden de 22 US\$/W en el año 1980 y para el año 2012 los precios estuvieron a 1,5 US\$/W

Costos de operación y mantenimiento

Una de las ventajas de los sistemas fotovoltaicos es su bajo costo de operación y mantenimiento, dado que no hay equipos o instalaciones que tienen desgaste por rozamiento, son estáticos y su operación se restringe a una inspección semanal de todos los componentes y realizar limpieza de los paneles para librarlos de suciedad.

En sistemas aislados que cuenta con sistemas de almacenaje de energía (Baterías), el cambio cada 2 a 3 años de la batería sería la actividad más costosa, sin embargo las baterías hoy en día son libres de mantenimiento y presentan una vida útil mayor a dos años, es decir ciclos de vida mayor a 1200 carga/descarga.

Para el caso de los costos de operación y mantenimiento se han estimado en base a las referencia de sistemas existentes y estas oscilan en el orden de 0.5% al 1,5% de costo de inversión (*Breyer et al, 2009;. IEA, 2010c*).

Calculo de los factores de planta de sistemas fotovoltaicos

Con respecto a los factores de planta, es decir a la cantidad de energía generada por el sistema estas oscilan entre 11% a un 19% para sistemas residenciales, estos valores fueron evaluados por la agencia internacional de energía (AIE, 2007), para instalaciones de Europa , USA, sin embargo para el caso del Perú se puede estimar valores superiores dado que la radiación solar en nuestra patria es mayor que la

¹³ Informe web – Mercados Eléctricos IEE 3372 – Junio del 2012

radiación solar recibida en europa, por lo tanto se puede esperar valores mayores a los descritos

Se ha realizado un análisis de los factores de planta de centrales fotovoltaicas de gran tamaño hoy conectadas al SEIN en el Perú, en el año 2013 se han encontrado los siguientes factores de planta anual:

Cuadro N° 4.7: Factores de Planta anual de centrales FV

Central Fotovoltaica	Potencia Instalada (MWp)	Energía Generada (MWH) año 2013	Factor de Planta Anual
Majes	20	50101	0,286
Repartición	20	50034	0,286
Panamericana	20	51685	0,295
Tacna Solar	20	49746	0,284

Fuente: Elaboración propia

Todas estas centrales están ubicadas en el sur del Perú, zona de alta radiación solar, considerando una radiación menor en la zona del proyecto podremos estimar que los factores de planta anual pueden estar entre 0,18 y 0, 20 conservadoramente hemos tomado 0,16 como factor de planta anual para estas unidades

Asimismo, hemos analizado los factores de planta mensual para estas cuatro centrales fotovoltaicas existentes para el año 2013, cuyo detalle se muestra en anexo N° 2 , en la que se nota que el máximo factor de planta mensual alcanzado es en el mes de noviembre es de 36,1 % que corresponde a la central solar Panamericana Solar (20 MW) y el factor de planta mensual mínimo alcanzado es de 20,2 % que corresponde a la central solar Tacna Solar (20 MW) en el mes de junio.

Cálculo del costo de energía para un sistema FV

El costo de generación eléctrica para un sistema FV depende de los costos de inversión en el sistema FV, los costos de operación y mantenimiento y de la radiación solar en el lugar de instalación del sistema. Para el cálculo del costo de la energía, se va a considerar las siguientes premisas adicionales a las indicadas anteriormente:

Costo de Inversión FV : 4000 a 5000 US\$/kWp

Costo O y M anual : 1.5% del Costo de Inversión

Vida Útil : 20 años
Tasa de descuento : 12% anual
Factor de Planta : 0.1 a 0.22

La metodología es la siguiente, se realiza un flujo de costos incluyendo la inversión inicial en el año 0 y los costos anuales a partir del año 1 hasta el año 20, no se considera el valor residual, se considera también la energía generada anual, se calcula el valor presente del flujo total de costos así como el de la energía anual generada al año 0 y luego se divide ambos factores, se halla el costo equivalente de la energía en US\$, los resultados se muestra en el capítulo V.

V. RESULTADOS

5.1 Resultados parciales

La evaluación de costos de generación eléctrica para sistemas de 10 a 100 kWp de sistemas fotovoltaicos, se han realizado teniendo en cuenta las premisas detalladas en el capítulo IV, ítem 4.2.2 y son los que se muestran a continuación:

Cuadro N° 5,1: Costos de Generación de la energía eléctrica de SFV hasta 100 kWp en US\$/ kWh para diferentes montos de inversión

Factor de Planta	5000 US\$/kWp	4750 US\$/kWp	4500 US\$/kWp	4250 US\$/kWp	4000 US\$/kWp
0,10	0,76	0,72	0,68	0,64	0,61
0,12	0,63	0,60	0,57	0,54	0,51
0,14	0,54	0,51	0,49	0,46	0,43
0,16	0,47	0,45	0,43	0,40	0,38
0,18	0,42	0,40	0,38	0,36	0,34
0,20	0,38	0,36	0,34	0,32	0,30
0,22	0,34	0,33	0,31	0,29	0,28

Fuente: Elaboración propia

Los costos de generación de un sistema fotovoltaico menor a 100 kWp, para un factor de planta base de 16% está oscilando entre 38 y 47 ctvs. De US\$/ kWh, sin embargo de acuerdo análisis efectuado y teniendo en cuenta que los costos de inversión están disminuyendo, así como los factores de planta anual en el Perú conservadoramente pueden estar en el orden del 20% para una radiación media entre 5 a 6 kWh/m² característico de la sierra del Perú.

Estos costos todavía están muy altos comparado con otras alternativas como la hidroeléctrica pequeña los cuales están alrededor de 6 ctvs. US\$/kWh.

Por otro lado, del análisis efectuado en el año 2010 por Osinergmin de localidades aisladas donde existe suministro eléctrico de origen térmico y los cuales son manejados por las municipalidades se ha encontrado que los costos unitarios de energía oscilan entre 0,17 a 0,70 US\$/ kWh, valores excesivamente altos cuyas causas han sido expuestas ampliamente en el capítulo 4.

La viabilidad técnica dependerá de las condiciones de radiación solar en la zona del proyecto, en la cual en el Perú los niveles mínimos encontrados en la zona de la selva es de 4,5 a 5,5 kWh/m² (Ver Anexo 3) la cual garantiza la generación de energía eléctrica con factores de planta anuales alrededor del 16% y como se explicó anteriormente los factores de planta alcanzado en la zona sur del Perú oscilan entre 20% al 36% durante el año lo cual garantiza un menor costo de generación y que está en e orden de 12 ctvs./kWh ¹⁴

5.2 Resultados finales

En la evaluación de los costos de energía de los sistemas fotovoltaicos no se ha introducido las ventajas económicas por ser energía limpia, los beneficios son concretos pero cuya evaluación económica son difícil de realizar o cuantificar, por lo tanto hay una forma directa de poder introducir esta ventaja, una a través de subsidios directos de las inversiones por parte del estado y/o organismos internacionales (Protocolo de K'oto) como son los bonos de carbono por implementación de energías limpias.

Se ha analizado la influencia de los subsidios directos de la inversión sobre el costo de la energía equivalente del sistema fotovoltaico, ver siguiente cuadro:

Costo de generación de energía eléctrica de sistemas FV, para un factor de planta de 0,16 y diferentes de financiamiento.

Cuadro N° 5,2: Costos de la energía eléctrica de SFV para diferentes esquemas de subsidios directos a la inversión

Subsidios (%)	5000 US\$/kWp	4750 US\$/kWp	4500 US\$/kWp	4250 US\$/kWp	4000 US\$/kWp
0	0,47	0,45	0,43	0,40	0,38
20	0,39	0,37	0,35	0,33	0,31
40	0,30	0,29	0,27	0,26	0,24
60	0,22	0,21	0,20	0,19	0,17
80	0,13	0,13	0,12	0,11	0,11
100	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04

Fuente: Elaboración propia

¹⁴ Valor ofertado como costo de generación para una central fotovoltaica de 16 MWp en la zona sur del Perú año 2014

Podremos decir que el costo de la energía generada para una unidad fotovoltaica menor a 100 kWp puede estar entre 17 a 22 ctvs. US\$/kWh para subsidios del orden del 60%, valores que pueden ser competitivos para aplicaciones concretas, especialmente para zonas de difícil acceso, muy alejados de las principales ciudades y con carga dispersa.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contratación de Hipótesis con los resultados.

Existe una coincidencia de la hipótesis planteada en el presente estudio de investigación con los resultados obtenidos mediante la metodología establecida en el presente estudio.

Es decir que los costos de la energía en algunos sistemas aislados¹⁵ con generación térmica oscilan entre 0,17 a 0,70 US\$/kWh y los costos de generación fotovoltaica para factores de planta 0,16 oscilan entre 0,38 a 0,47 US\$/kWh, por lo tanto para algunos sectores donde el costo de la energía presentan valores mayores a los 0,47 US\$/kWh se hace factible la complementación de la energía eléctrica para atender la demanda a través de estos sistemas fotovoltaicos.

Si el estado, dicta normas específicas que incentiven el desarrollo de pequeños sistemas fotovoltaicos, instalaciones menores a 100 kWp, a través de subsidios directos, la viabilidad técnica y económica del uso de estos sistemas quedaran garantizado, toda vez para un subsidio del orden del 40% los costos de generación estarían en el orden de 0,24 a 0,30 US\$/kWh, lo que hace más factible su implementación.

Es bueno aclarar, la sostenibilidad del proyecto se garantiza solo si los ingresos por tarifas cubren este costo equivalente de la energía, por lo tanto hay los costos de energía de estos sistemas fotovoltaicos son todavía muy altos comparado con la tarifa eléctrica que pagan los usuarios domésticos rurales, que para la zona del proyecto, la tarifa que pagan los usuarios finales residenciales con consumos menores a 30 kWh es de 7 ctvs. US\$/kWh más un cargo fijo de 1 US\$/mes. Esta tarifa está subvencionada a través del FOSE, que es fondo de compensación

¹⁵ Ver anexo N° 4: Sistemas aislados con generación térmica en el Perú

eléctrica, para estos usuarios con consumos menores a los 30 kWh/mes.

6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares.

Adinelsa en su evaluación efectuada a los sistemas fotovoltaicos domiciliarios a su cargo de 55 Wp, entre el periodo 2002 al 2005 en el departamento de Pasco¹⁶ ha calculado que el costo de generación de estos sistemas fotovoltaicos es de 0,911 US\$/ kWh, valor que no considera ningún subsidio en la inversión, valor un poco mayor al que se obtuvo en la evaluación efectuada en la tesis, sin embargo para factores de planta de 10%, el valor está muy cerca al valor dado por Adinelsa para los sistemas fotovoltaicos domiciliarios, la diferencia se explica, primero que a la fecha los costos han seguido bajando, por lo tanto hoy en día los costos de generación de energía eléctrica son menores que hace 5 años atrás.

Para sistemas de gran tamaño y conectados a un sistema eléctrico como es el caso del SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional), los costos declarados por los concesionarios de las centrales solares fotovoltaicas como es la CT Majes Solar 20 T (20 MWp), la Central Solar Panamericana Solar (20 MW) están en el orden de 0,22 US\$/kWh para el año 2010, la Central Moquegua FV SAC (16 MWp) ha declarado costos de 0,12 US\$/kWh valor declarado en el año 2011 con factor de planta del 30,5%.

En nuestro caso, para costos de inversión del orden de 4000 US\$/ kW y factores de planta del orden del 30% se obtiene un costo equivalente de la energía del orden de 0,20 US\$/kWh, valor muy cercano al valor declarado para este gran sistema, por lo que se presume que los costos de inversión de estos sistemas fotovoltaicos están cada día bajando, tal como lo expresan las diferentes publicaciones especializadas en el tema, por lo tanto se logra validar con estudios similares que los resultados obtenidos dan viabilidad al uso de celdas fotovoltaicas en zonas rurales aisladas de alta densidad.

¹⁶ Estudio efectuado por Adinelsa en el año 2007, Resultados del Proyecto Piloto de Administración de sistemas fotovoltaicos domésticos periodo 2002 – 2005 en el Departamento de Pasco, propuestas de subvención e incentivos.

VII. CONCLUSIONES

En el presente estudio podemos concluir lo siguiente:

- a) Con respecto a la viabilidad técnica, esta tecnología ha avanzado mucho y ha alcanzado la madurez en su desarrollo, motivo por el cual muchos países, especialmente los europeos han optado por implementar dentro de su matriz energética la generación a través de paneles fotovoltaicos, siendo su participación en la cobertura de la demanda eléctrica por encima del 15% en algunos casos.
- b) Existen diferentes tipos de tecnologías en el desarrollo de los paneles fotovoltaicos, los cuales siguen en proceso de investigación la cual combinan la disponibilidad de materiales, los costos de fabricación y los rendimientos obtenidos alcanzando valores en el orden de 40% para celdas multifunción con concentrador a nivel de laboratorio.
- c) La flexibilidad en la implementación de estos sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica, hace que su implementación para casos específicos sean cada vez más atractivos, desde el punto de vista técnico y económico, pues ellas se pueden aplicar por ejemplo en sistemas aislados que no cuentan con redes eléctricas, como generación distribuida en los techos de las viviendas y/o edificios dentro de las ciudades.
- d) Los Costos de Generación de Energía Eléctrica a través de Sistemas Fotovoltaicos (20 MW) todavía son los más caros comparados con otras alternativas como la Hidroeléctricas menores de 20 MW cuyo costo medio es de 5,3 ctvs. US\$/kWH, Centrales Eólicas 90 MW – 6,9 ctvs US\$/kWH, Solares Fotovoltaicas 20 MW 12 ctvs. US\$/kWH.
- e) Que los costos de generación de energía eléctrica por sistemas fotovoltaicos menores de 100 kWp y para factores de planta del orden del 16% están en el orden de 0,38 a 0,47 US\$/kWH valor que depende del costo de inversión asumido (4000 a 5000 US\$/kWp)
- f) Si el estado incentiva la implementación de estos sistemas a través de subsidios directos en la inversión, como por ejemplo si se subsidia un 40% del costo de inversión el costo estaría en el orden 0,24 a 0,30 US\$/kWH, poniendo a esta alternativa muy competitiva respecto a otras fuentes de energía.
- g) Los costos de generación térmica aislada (Grupos Diesel operados con petróleo D2), según estudios realizados por Osinergmin en el año 2010, oscilan entre 0,17 a 0,70 US\$/kWH, valores excesivamente altos, por lo que una alternativa que

puede cubrir parte de la demanda eléctrica en esas localidades, son la instalación de paneles fotovoltaicos.

- h) La viabilidad económica de su implementación está garantizada en localidades cuyos costos de generación térmica sean mayores a 0,30 US\$/kWH, por lo tanto hay un nicho de mercado que debe ser estudiado con detenimiento.
- i) Con respecto a la sostenibilidad del proyecto, el estado solo debe modificar los alcances del FOSE e incluir a los usuarios que opten por el uso de paneles fotovoltaicos para su autogeneración y posterior venta a las empresas de distribución cuando exista un superávit en la autogeneración, de tal manera que puedan ayudar a la cobertura de la demanda eléctrica.
- j) Queda claro que la principal ventaja de estas celdas fotovoltaicas es que no emiten ningún gas de efecto invernadero y está catalogada como una de las principales fuentes de energía limpias compatible con la conservación de medio ambiente, además es fácil de instalar y sus costos de operación y mantenimiento son muy bajos. Sin embargo su bajo factor de planta y baja eficiencia y su alta dependencia de la variabilidad climática hacen que su implementación sea todavía restringida y sea complementaria con otras tecnologías existentes para satisfacer la demanda eléctrica.
- k) Existe información básica sobre los niveles de radiación disponible para cada región del Perú, información brindada por el Atlas Solar elaborado por el SENAMHI en convenio con la DGER- MEM, así como la información brindada por la NASA dentro de su página web.

VIII. RECOMENDACIONES

- a) Implementar sistemas fotovoltaicos que permitan mejorar el servicio eléctrico en aquellas localidades (ver anexo N° 4) que pese a tener un servicio eléctrico, este es de pésima calidad y muchas veces de un uso restringido debido a su alto costo de generación, especialmente por el precio y costos de transporte del combustible a aquellos lugares muy alejados y de difícil acceso.
- b) Dado el estado de avance de esta tecnología, se recomienda la implementación dentro de la Universidad del Callao grupos de investigación multidisciplinarios que permitan plantear el uso de los sistemas fotovoltaicos recomendando que tecnologías y donde deben ser aplicadas basadas en experiencias propias en nuestra patria.
- c) Dada la flexibilidad de esta tecnología la implementación deberá ser efectuada de una manera paulatina, primero atendiendo a cargas especiales como son los

centros educativos, postas médicas y proyectos de desarrollo productivo, así como, para alimentar a sistemas de bombeo para el suministro de agua potable para el centro poblado.

- d) Dada la alta sensibilidad del costo de la energía generada por las celdas fotovoltaicas, su implementación debe ser cuidadosamente planeada teniendo en cuenta la tecnología a ser usada para cada caso en particular y que les permita minimizar las inversiones y maximizar la energía generada.
- e) El estado debe asumir su rol planificador y promotor aplicando ya los sistemas de incentivo económico que cuenta como es el caso del FOSE y FISE respectivamente, esto permitirá garantizar la sostenibilidad del Proyecto
- f) Si bien es cierto que el estado ya ha dado normas y leyes que han permitido la rápida implementación de estos sistemas fotovoltaicos en el Perú, todavía faltan dar normas específicas que permitan el desarrollo de las fuentes no convencionales como generación distribuida y que permita el autoabastecimiento optimizando de esta manera el beneficio de la tecnología fotovoltaica.
- g) Priorizar la implementación de sistemas FV en los siguientes localidades:

Departamento	Localidad	Sistema Elctrico Rural	Estado de la generación	Nombre de la Central	Potencia Instalada (KW)	Horas de Funcionamiento	Numero total de Usuario	Costo de combustible (S./gt)
Ucayali	Puerto Esperanza	Sistema Elctrico Puerto Esperanza	Operativo	Puerto Esperanza	288	8	356	28
Loreto	Bellavista	Bellavista	Operativo	Bellavista	30	3	85	22
Loreto	Nueva Angusilla	Nueva Angusilla	Operativo	Nueva Angusilla	36	3	30	20
Loreto	Bellavista	Bellavista	Operativo	Bellavista	16	2.5	38	20
Loreto	Yahuma Callaru	Yahuma Callaru	Inoperativo	Yahuma Callaru	60	3	80	20
Loreto	Bellavista Callaru	Bellavista Callaru	Inoperativo	Bellavista Callaru	240		600	20
Loreto	Buen Jardín	Buen Jardín	Inoperativo	Buen Jardín	15	3	38	20

Fuente: Osinergmin

- h) El estado en convenio con las Instituciones (Senamhi) y Universidades deben actualizar en forma permanente las mediciones de los niveles de radiaciones solares para cada área de nuestro territorio nacional y que permita contar con la información actualizada y necesaria para ser utilizada en los proyectos de implementación de los sistemas fotovoltaicos u otra forma de aprovechamiento de la energía solar, que es gratis y abundante.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) Energías Renovables para el Desarrollo – Autor José M^a De Juana – Editorial Paraninfo SA – 2002 – España
- (2) Centrales de Energías Renovables Autores Jose Antonio Carta Gonzales, Roque Calero Pérez, Antonio Colmenar Santos y Manuel Alonso Castro Gil Editorial Pearson Educación SA 2009 – Madrid, España
- (3) Energía Solar Fotovoltaica - 7ma Edición - Bureau Veritas Formación – Javier María Méndez Muñiz- Rafael Cuervo García – Editorial Fundación Confemetal – Madrid, España
- (4) Curso sobre Energía Solar – Universidad de Delft – Prof. Arno Smets año 2014
- (5) Paper Universidad Nacional del Noroeste – Argentina Llamazares, Alberto - Busso, Arturo J. - Bajales Luna, Noelia - Generación fotovoltaica : Caracterización de una celda comparando datos experimentales y simulados aplicando un modelo teórico simple – año 2000
- (6) Generación de energía solar fotovoltaica – Luis Jutglar Banyeres – Editorial Marcombo – España 2012 – primera edición
- (7) Solar Energy – Fundamental, Technology and Systems – Copyright Delft University of Technology, 2014 – Klaus Jäger, Olindo Isabella, Arno H.M. Smets, René A.C.M.M. Van Swaaij, Miro Zeman
- (8) Revista Renewables – Made in Germany edición 2013 – 2014, www.Renewables-made-in-Germany.com
- (9) David Orosco Zumaran – Evaluación económica de generación de energía eléctrica fotovoltaica conectados a redes en mercados eléctricos desregulados – Año 2000
- (10) Dirección Ejecutiva de Proyectos - PNUD – Senamhi – Atlas de la energía Solar en el Perú – Enero 2003

- (11) Ministerio de Energía y Minas – Dirección General de Electricidad –
Guía de instalación de sistemas fotovoltaicos domésticos – Diciembre del 2007
- (12) Dirección General de la electrificación rural – Plan Nacional de la
Electrificación Rural (PNER) – periodo 2011- 2020 – Diciembre del 2010.
- (13) Osinergmin - Resolución de consejo directivo organismo supervisor de
la inversión en energía y minería Osinergmin N° 200-2009-OS/CD -
Procedimiento sobre Hibridación de Instalaciones de Generación Eléctrica que
Utilicen Recursos Energéticos Renovables
- (14) Ministerio de Energía y Minas – Política energética Nacional del Perú
2010 – 2040 - Decreto Supremo N° 064-2010 – EM del 24.11.2010
- (15) Enrique Millones – Ministerio de Energía y Minas – Marco de evaluación
de impactos ambientales para el proyecto de electrificación rural en el Perú

ANEXOS

Anexo A: Consentimiento Informado

Anexo N° 1: Costos de Sistemas Fotovoltaicos

Anexo N° 2: Factores de Planta de sistemas Fotovoltaicos

Anexo N°3: Niveles de radiación diaria – promedio anual de principales ciudades del Perú.

Anexo N° 4: Sistemas Aislados con Generación Térmica en le Perú Manejados por las Municipalidades

Anexo N° 5: Matriz de Consistencia

Anexo N° 1: Costos de Sistemas Fotovoltaicos



CNBM Solar Monocrystalline Series (95W-120W)

Characteristics

Max Power Voltage $V_{mp}(V)$	17.1	17.1	17.4	17.9	18.4
Max Power Current $I_{mp}(A)$	5.57	5.84	6.04	6.16	6.54
Open Circuit Voltage $V_{oc}(V)$	21.7	21.7	21.8	22.0	22.2
Short Circuit Current $I_{sc}(A)$	6.36	6.52	6.72	6.81	7.07
Max Power $P_m(W)$	95	100	105	110	120

Temperature Coefficient of Cells

NOCT	47°C ±2°C
Temperature Coefficients of I_{sc} (%/°C)	0.03
Temperature Coefficients of V_{oc} (%/°C)	-0.333
Temperature Coefficients of P_m (%/°C)	-0.459

Mechanical Data

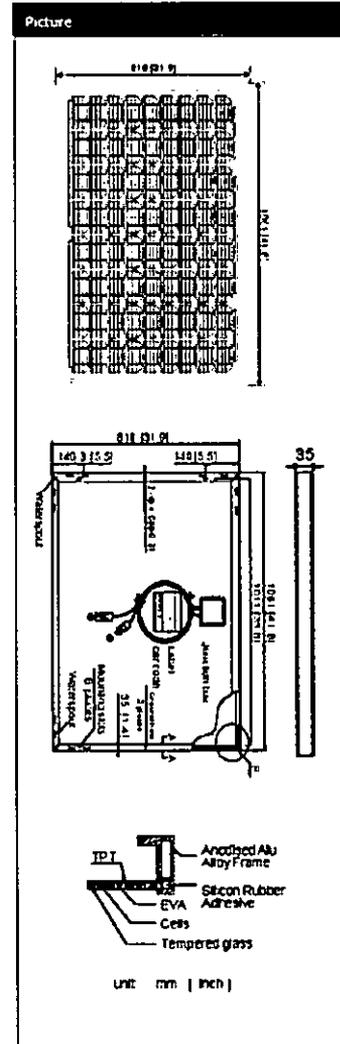
Dimension	1061 x 810 x 35 mm
Weight	12 kg
No. of Cells and Connections	72 (8 x 9)
Tolerance	±3%
Cell	Monocrystalline Cell 125 x 82.3 mm

Limits

Operating Temperature	-40 °C to +85°C
Storage Temperature	-40 °C to +85°C
Max System Voltage	1000VDC

Guarantees

Products Guarantee	3 yrs free from defects in materials and workmanship
Certificates	CE



For more information of
CNBM Solar products,
please visit
www.cnbmsolar.com



* The data does not refer to a single module and it is not part of the offer.
It is only for comparison only to different module types.

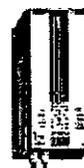
C. Autoconsumo

01 PlugSave		P.V.P.
2298090	PlugSave XS	766,00
	<ul style="list-style-type: none"> 1 Panel Policristalino 1 Estructura PlugSave para 1 módulo Policristalino 1 Inversor a Red Enecsys S240W-ED 1 Cable de Conexión AC con Clavija 5 mts 1 Conector MC4 (6mm) PV-KST4/6M-Hembra 1 Conector MC4 (6mm) PV-KST4/6M-Macho 	
2298005	PlugSave S	832,00
	<ul style="list-style-type: none"> 3 Paneles CIS 1 Estructura PlugSave para 3 módulos Policristalinos 1 Inversor a Red Steca Grid500-M 500W IP20 1 Conector MC3 Precableado - macho/hembra (juego) 1 Conector MC4 Hembra Precableado 2 mts 1 Conector MC4 Macho Precableado 2 mts 	
2298010	PlugSave M	1.065,00
	<ul style="list-style-type: none"> 2 Paneles Monocristalino 1 Estructura PlugSave para 2 módulos Monocristalinos 1 Inversor a Red Steca Grid300-M1 300W IP20 1 Conector MC3 Precableado - macho/hembra (juego) 1 Conector Tyco Hembra Precableado 2 mts 1 Conector Tyco Macho Precableado 2 mts 	
2298015	PlugSave L	1.139,00
	<ul style="list-style-type: none"> 2 Panel Policristalino 2 Estructuras PlugSave para 1 módulo Policristalino 1 Inversor a Red Enecsys DM60W-ED 1 Cable de Conexión AC con Clavija 5 mts 1 Conector MC4 (6mm) PV-KST4/6M-Hembra 1 Conector MC4 (6mm) PV-KST4/6M-Macho 	
2298020	PlugSave XL	1.332,00
	<ul style="list-style-type: none"> 3 Paneles Monocristalinos 1 Estructura PlugSave para 3 módulos Monocristalinos 1 Inversor a Red Steca Grid 500-M1 500W IP20 1 Conector MC3 Precableado - macho/hembra (juego) 1 Conector Tyco Hembra Precableado 2 mts 1 Conector Tyco Macho Precableado 2 mts 	
2298290	Cuadro Conexión PlugSave CC/CA para stecca grid	169,00



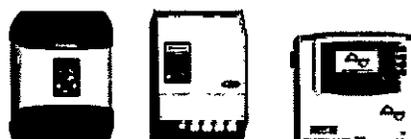
Reguladores PWM

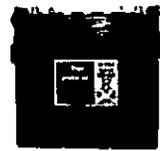
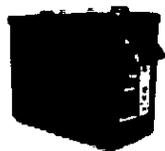
CÓDIGO	MODELO	DESCRIPCIÓN	PVP
334398	Solsum 6.6F	Regulador 6A, 12/24V	24,10 €
334399	Solsum 8.8F	Regulador 8A, 12/24V	32,14 €
334400	Solsum 10.10F	Regulador 10A, 12/24V	42,85 €
334401	PR1010	Regulador 10A, 12/24V, con display	105,78 €
334402	PR1515	Regulador 15A, 12/24V, con display	125,87 €
334403	PR2020	Regulador 20A, 12/24V, con display	147,29 €
334404	PR3030	Regulador 30A, 12/24V, con display	174,07 €
334405	PRS1010	Regulador 10A, 12/24V, con leds	69,63 €
334406	PRS1515	Regulador 15A, 12/24V, con leds	74,98 €
334407	PRS2020	Regulador 15A, 12/24V, con leds	83,02 €
334408	PRS3030	Regulador 15A, 12/24V, con leds	110,83 €
334409	PA RC100	Programador reguladores sin display (Solsum, PRS, MPPT)	206,00 €



GAMA XPC

CÓDIGO	MODELO	DESCRIPCIÓN	PVP
302371	XPC 1400-12	Inversor-cargador Studer 12VCC, 230VAC, Pnom: 1100VA	1.550,96 €
302372	XPC 2200-24	Inversor-cargador Studer 24VCC, 230VAC, Pnom: 1600VA	1.638,39 €
302373	XPC 2200-48	Inversor-cargador Studer 48VCC, 230VAC, Pnom: 1600VA	1.727,10 €
302364	RCC-01	Control remoto para familia XPC	282,16 €





Baterías Plomo Ácido

CÓDIGO	MODELO	DESCRIPCIÓN	PVP
303366	24TMX	Batería 12V, 94Ah C100	163,66 €
303367	27TMX	Batería 12V, 117Ah C100	164,85 €
303368	J150	Batería 12V, 166Ah C100	242,40 €
422067	J-185E-AC	Batería 12V, 194Ah C101	317,50 €
372478	J-185H-AC	Batería 12V, 249Ah C100	376,54 €
303371	J305P	Batería 6V, 367Ah C100	297,41 €
303372	L16P	Batería 6V, 467Ah C100	364,56 €
303373	IND9-6V	Batería 6V, 545Ah C100	987,36 €

Anexo N° 2: Factores de Planta de Sistemas Fotovoltaicos en el Perú

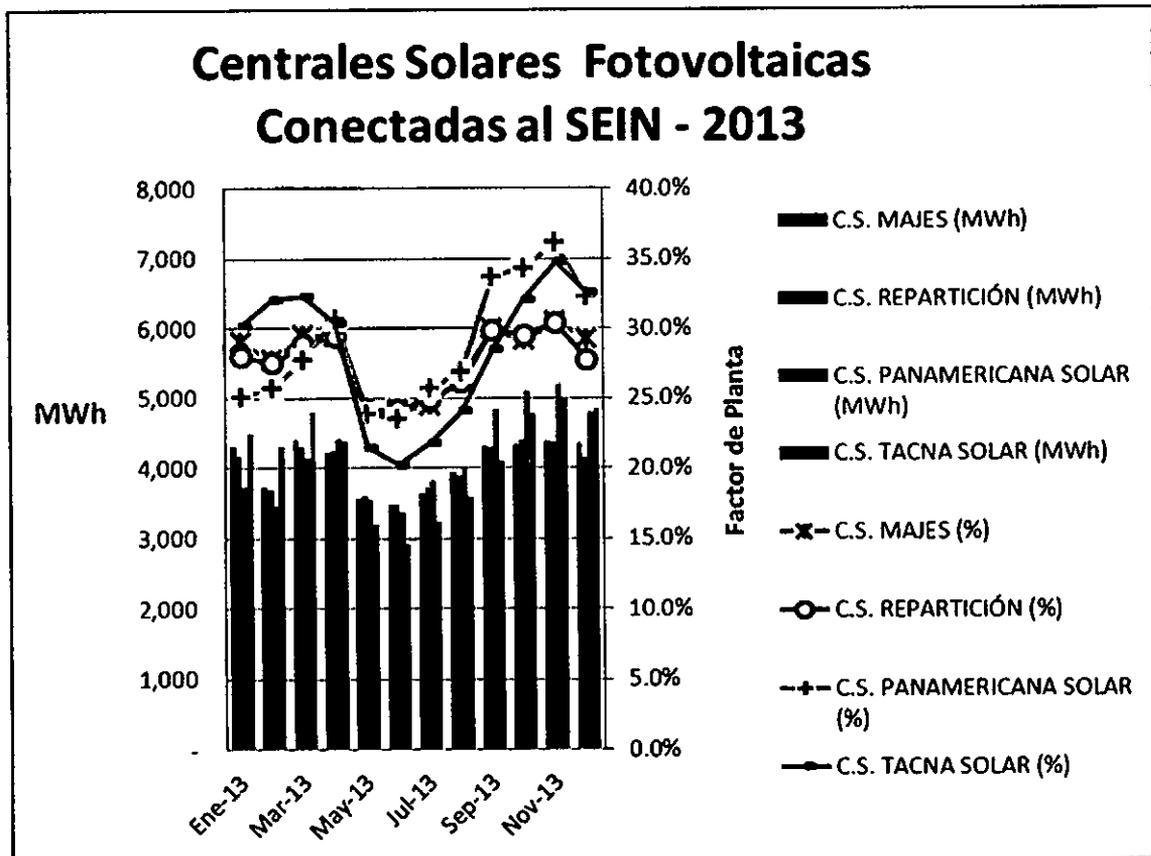
ANÁLISIS DE FACTORES DE PLANTA DE CENTRALES SOLARES FOTOVOLTAICAS CONECTADAS AL SEIN

CENTRAL	Potencia Instalada
C.S. MAJES (MW)	200
C.S. REPARTICIÓN (MW)	200
C.S. PANAMERICANA SOLAR (MW)	200
C.S. TACNA SOLAR (MW)	200

CENTRAL	Ene-13	Feb-13	Mar-13	Abr-13	May-13	Jun-13	Jul-13	Ago-13	Sep-13	Oct-13	Nov-13	Dic-13
C.S. MAJES (MWh)	4214	3776	4332	4231	3579	3679	3832	3537	4205	4334	4051	4333
C.S. REPARTICIÓN (MWh)	4189	3697	4261	4215	3553	3673	3721	3531	4302	4353	4032	4125
C.S. PANAMERICANA SOLAR (MWh)	3725	3456	4127	4215	3550	3363	3516	3352	4215	3555	3751	3772
C.S. TACNA SOLAR (MWh)	4492	4307	4606	4376	3151	2912	3241	3551	4103	4770	5005	4643

CENTRAL	Ene-13	Feb-13	Mar-13	Abr-13	May-13	Jun-13	Jul-13	Ago-13	Sep-13	Oct-13	Nov-13	Dic-13
C.S. MAJES (%)	26.0%	27.7%	29.5%	29.4%	24.0%	24.1%	24.4%	25.3%	29.5%	29.3%	30.4%	29.2%
C.S. REPARTICIÓN (%)	26.0%	27.5%	29.8%	29.4%	24.2%	24.1%	24.5%	25.1%	29.5%	29.3%	30.3%	27.7%
C.S. PANAMERICANA SOLAR (%)	23.1%	23.9%	27.7%	30.7%	23.9%	23.5%	25.7%	26.8%	33.7%	34.5%	35.1%	32.2%
C.S. TACNA SOLAR (%)	24.9%	22.0%	22.5%	10.4%	21.4%	23.2%	21.8%	24.1%	28.5%	32.1%	34.8%	32.6%

Fuente: Elaboración propia



Anexo N° 3: Niveles de Radiación diaria promedio anual de las principales ciudades del Perú

Niveles de radiación diaria media anual

Nº	Departamento	Estación	IRRADIACION DIARIA MEDIA ANUAL kWh/m ²
1	Loreto	Guayabamba	4.47
2	Ucayali	Neshuya	4.48
3	Madre de Dios	Fundo Iberia	4.52
4	Junin	San Ramón	4.50
5	Ucayali	San Jorge	4.56
6	Ucayali	Yurac	4.32
7	Piura	Tablazo	5.13
8	Lambayeque	Granja M. Sasape	5.32
9	Lambayeque	Tinajones	5.36
10	Lambayeque	Hda Pucalá	5.35
11	Lambayeque	Cayaltí	5.11
12	La Libertad	Casa Grande	4.80
13	La Libertad	Cartavio	4.86
14	Tumbes	Los Cedros	4.86
15	Tumbes	Zorritos	4.94
16	Piura	Tejedores	4.99
17	Ancash	San Jacinto	4.90
18	Cajamarca	Llama	6.30
19	Ancash	San Lorenzo	5.56
20	Lima	Don Martín	4.22

Fuente : Senamhi

Nº	Departamento	Estación	IRRADIACION DIARIA MEDIA ANUAL kWh/m ²
21	Lima	La Punta	3.64
22	Lima	Campo Marte	3.98
23	Lima	Cañete	4.01
24	Ica	Hda Mayor	5.60
25	Cajamarca	Huambos	5.77
26	Huanuco	Huanuco	5.15
27	Piura	Huancabamba	5.03
28	Cusco	Quillabamba	4.86
29	Cusco	Univers. Cusco	5.39
30	Apurimac	Abancay	5.21
31	Cajamarca	bambamarca	5.17
32	Cajamarca	Llaucan	4.86
33	Cajamarca	Cajamarca	4.59
34	Ancash	Querococha	4.82
35	Ancash	Lampa Bajo	5.40
36	Ancash	Lampa Alto	5.07
37	Ancash	Conococha	5.25
38	Pasco	Atacocha	5.45
39	Avacucho	Palcachaca	6.84
40	Huancavelica	Tunel Cero	5.85
41	Arequipa	Angostura	6.13
42	Arequipa	Caylloma	6.14

Fuente : Senamhi

Niveles de radiación diaria media anual

Nº	Departamento	Estación	IRRADIACION DIARIA MEDIA ANUAL kWh/m ²
41	Arequipa	Angostura	6.13
42	Arequipa	Caylloma	6.14
43	Puno	Salcedo	6.34
44	Puno	Huraya-Moho	6.11
45	Arequipa	Pañe	5.25
46	Arequipa	Sibayo	5.83
47	Puno	Cuen. Rioverde	6.07
48	Puno	Lacunillas	6.41
49	Puno	Capachica	6.59
50	Arequipa	Imata	6.01
51	Arequipa	El Fraile	5.78
52	Puno	Juli	6.32
53	Puno	Desaguadero	6.58
54	Arequipa	La Joya	4.99
55	Moquegua	La Salle Pampi	6.88
56	Ayacucho	Cechapampa	6.62
57	Piura	Tahona	5.30
58	Cajamarca	Lajas	5.37

Fuente : Senamhi

Nº	Departamento	Estación	IRRADIACION DIARIA MEDIA ANUAL kWh/m ²
59	San Martín	Tarepoto	4.50
60	Lambayeque	Lambayeque	5.00
61	Ancash	Huaraz	5.75
62	Lima	Andahuasi	5.79
63	Junin	I. Geofísico. Huancayo	6.78
64	Lima	La Molina	4.09
65	Lima	Alcantarilla	4.39
66	Lima	Sta. Rosa	5.23
67	Cusco	Granja Kcayra	5.28
68	Ica	Ica	5.27
69	Puno	Puno	6.80
70	Arequipa	Pampa de Maies	5.11
71	Arequipa	Characato	7.09
72	Moquegua	Pta. Coles	4.86
73	Moquegua	Moquegua	6.13
74	Tacna	Celana	5.44
75	Arequipa	Pampa Blanca	4.27
76	Arequipa	Haciendita	5.23

Fuente : Senamhi

Niveles de radiación diaria media anual

J. W. VASQUEZ - P. LLOYD UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, LIMA, PERU UNIVERSITY COLLEGE CARDIFF, WALES, GREAT BRITAIN				IRRADIACION DIARIA MEDIA ANUAL KWh/m2
Nº	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO/LOCALIDAD	
1	TUMBES	TUMBES	CORRALES	4.479
2	PIURA	TALARA	EL ALTO	4.048
3	PIURA	PIURA	TAMBO GRANDE	4.983
4	PIURA	PIURA	EL TABLAZO	5.109
5	PIURA	PAITA	SAN JACINTO	4.648
6	PIURA	MORROPON	CHULUCANAS	4.779
7	PIURA	PIURA	CASTILLA	5.128
8	PIURA	HUANCABAMBA	HUANCABAMBA	6.672
9	LAMBAYEQUE	LAMBAYEQUE	LAMBAYEQUE	4.862
10	LAMBAYEQUE	CHICLAYO	CAYALTI	5.446
11	LA LIBERTAD	ASCOPE	CASAGRANDE	4.416
12	LA LIBERTAD	ASCOPE	CARTAVIO	4.768
13	LA LIBERTAD	TRUJILLO	LAREDO	4.275
14	LA LIBERTAD	TRUJILLO	TRUJILLO	4.744
15	LA LIBERTAD	TRUJILLO	GUANAPE NORTE VIRU	4.533
16	ANCASH	SANTA	NEPENA	5.159
17	ANCASH	HUARAZ	HUARAZ	5.138
18	ANCASH	HUARMEY	PUNTA LAS ZORRAS	5.087
19	LIMA	BARRANCA	PARAMONGA	3.832
20	LIMA	CHANCAY	POMMACANA	4.270
21	LIMA	CHANCAY	ANDAHUASI - SAYAN	5.139
22	LIMA	CHANCAY	HOMAYA - HUADRA	4.881
23	LIMA	LIMA	JESUS MARIA	3.811
24	LIMA	LIMA	LA MOLINA	3.371
25	LIMA	CANETE	SAN VICENTE DE CANETE	4.294
26	ICA	CHINCHA	CHINCHA ALTA	4.189
27	ICA	ICA	CAUCATO	4.754
28	ICA	ICA	MANRIQUE	4.523
29	ICA	ICA	ICA	4.894
30	ICA	ICA	PARCONA	5.040
31	ICA	NAZCA	HDA MAJORO	5.024
32	ICA	NAZCA	MARCONA	4.941
33	AREQUIPA	CAILLONA	SIBAYO	4.940
34	AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	5.313
35	AREQUIPA	AREQUIPA	CHARACAYO	5.322
36	AREQUIPA	AREQUIPA	PAMPA DE MAJES	5.610
37	MOQUEGUA	MARISCAL NIETO	MOQUEGUA	5.363
38	TACNA	TARATA	PAUCARANI	5.408
39	TACNA	TACNA	CALANA	4.991
40	CAJAMARCA	CAJAMARCA	CAJAMARCA	4.487
41	HUANUCO	LEONCIO PRADO	TINGO MARIA	4.016
42	HUANUCO	HUANUCO	HUANUCO	4.515
43	JUNIN	CHANCHAMAYO	HUMAYA	4.854
44	JUNIN	CHANCHAMAYO	SAN RAMON	3.981
45	JUNIN	HUANCAYO	HUACHAC	4.872
46	HUANCAVELICA	CASTRO - VIRREY	ACONOCOCCHA	4.580
47	AYACUCHO	HUAMANGA	AYACUCHO	4.889
48	APURIMAC	ABANCAY	ABANCAY	4.749
49	CUZCO	LA CONVENCION	SANTA ANA	4.008
50	CUZCO	CUZCO	SAN JERONIMO	4.691
51	PUNO	HUANCANÉ	HUARAYA	5.161
52	PUNO	PUNO	PUNO	5.190
53	PUNO	CHUCUITO	JULI	5.048
54	AMAZONAS	BAGUA	EL CENEPA	2.886
55	AMAZONAS	BAGUA	HDA VALOR	4.463
56	SAN MARTIN	SAN MARTIN	JUAN GUERRA	3.953
57	LORETO	MAYNAS	IQUITOS	3.727
58	LORETO	REQUENA	REQUENA	3.863
59	LORETO	ALTO AMZONAS	SANTA MARIA	3.560
60	LORETO	ALTO AMZONAS	YURIMAGUAS	4.143
61	LORETO	UCAYALI	NESHUAYA	2.505
62	UCAYALI	PADRE ABAD	PADRE ABAD	4.015
63	UCAYALI	ATALAYA	YURAC - YURHA	3.137
64	MADRE DE DIOS	TANQAMANU	IBERIA	3.676

Fuente : Senamhi

Niveles de radiación diaria media anual

CIUDAD CAPITAL DE DEPARTAMENTO	ENERGIA SOLAR DIARIA PROMEDIO ANUAL kWh/m ²
TUMBES	5.67
PIURA	5.54
CHICLAYO	5.50
TRUJILLO	5.13
HUARAZ	5.29
LIMA	5.13
ICA	5.50
AREQUIPA	6.08
MOQUEGUA	6.04
TACNA	5.83
PUNO	5.21
CUSCO	5.17
ABANCAY	5.13
AYACUCHO	5.17
HUANCAVELICA	5.33
HUANCAYO	5.33
CERRO DE PASCO	5.46
HUNUCO	4.83
CAJAMARCA	5.25
CHACHAPOYAS	4.67
MOYOBAMBA	4.67
IQUITOS	4.42
PUCALLPA	4.63
PUERTO MALDONDO	4.79

Fuente : Senamhi

**Anexo N° 4 : Sistemas Aislados con generación Térmica operadas por las
Municipalidades Distritales**

Sistemas Aislados con Generación Térmica

Departamento	Localidad	Sistema Eléctrico Rural	Propietario Del SER	Estado de la generación	Nombre de la Central	Potencia Instalada (KW)	Horas de Funcionamiento	Numero total de Usuario	Costo de combustible (\$/glt)
Ucayali	Puerto Esperanza	Sistema Eléctrico Puerto Esperanza	Municipalidad Provincial de Purús FONCODES Gobierno Regional Ucayali	Operativo	Puerto Esperanza	288	8	356	28
Loreto	Bellavista	Bellavista	Municipalidad Distrital de Jeberos	Operativo	Bellavista	30	3	85	22
Loreto	Nueva Angustilla	Nueva Angustilla	Municipalidad Distrital Teniente Manuel Clavero	Operativo	Nueva Angustilla	36	3	30	20
Loreto	Bellavista	Bellavista	Municipalidad Distrital Teniente Manuel Clavero	Operativo	Bellavista	16	2.5	38	20
Loreto	Yahuma Callaru	Yahuma Callaru	Comité de Electrificación y Municipio	Inoperativo	Yahuma Callaru	60	3	80	20
Loreto	Bellavista Callaru	Bellavista Callaru	Comité de Electrificación de Bellavista Callaru	Inoperativo	Bellavista Callaru	240		600	20
Loreto	Buen Jardín	Buen Jardín	Comité de Electrificación y Municipio	Inoperativo	Buen Jardín	15	3	38	20
Loreto	Vista Alegre	Vista Alegre	Municipalidad Distrital de Jeberos	Operativo	Vista Alegre	20	2	25	18
Loreto	San Antonio de Rumiayacu	San Antonio de Rumiayacu	Municipalidad Distrital de Jeberos	Inoperativo	San Antonio de Rumiayacu	20	2.5	31	18
Loreto	Chinería	Chinería	Comité de Electrificación y Municipio de Yavarí	Inoperativo	Chinería	15	3	35	18
Loreto	Lago San Marcos	Sistema Eléctrico de Lago San Marcos	Municipalidad Distrital Benito San Martín	Inoperativo	Lago San Marcos	40	0	120	18
San Martín	Huimbayoc	Huimbayoc	Municipalidad Distrital	Operativo	Huimbayoc	120	3	410	18
Loreto	Rondña I Zona	Rondña I Zona	Comité de Electrificación y Municipio de Yavarí	Inoperativo	Rondña I Zona	10	4	37	17.5
Loreto	Puerto Alegria	Puerto Alegria	Comité de Electrificación y Municipio de Yavarí	Inoperativo	Puerto Alegria	60	4	115	17
Loreto	Santa Rosa	Santa Rosa	Gobierno Regional de Loreto	Operativo	Santa Rosa	100	5	320	17
Huanuco	Príncipe de Paz	Sistema Eléctrico Príncipe de Paz	Comité de Electrificación	Operativo	Príncipe de Paz	16	3	50	16
Loreto	San Gabriel De Varadero	San Gabriel De Varadero	Municipalidad Distrital de Balsapuerto	Inoperativo	San Gabriel Varadero	61.6		93	16
Loreto	Alianza Cristiana	Alianza Cristiana	Municipalidad Distrital de Andoas	Inoperativo	Alianza Cristiana	55.2	4	240	16
Loreto	Intuto	Intuto	Municipalidad Distrital de El Tigre	Operativo	Intuto	400	4	468	16
Loreto	Buen Suceso	Buen Suceso	Municipalidad Distrital de Yavarí	Inoperativo	Buen Suceso	17.6	4	51	16
Loreto	Santa Teresa	Santa Teresa	Municipalidad Distrital de Yavarí	Inoperativo	Santa Teresa	10	4	140	16
Loreto	La Pedrera	Sistema Eléctrico de La Pedrera	Municipalidad Distrital de Sarayacu	Operativo	La Pedrera	72	3	152	16
Loreto	San Ramon	Sistema Eléctrico de San Ramón	Municipalidad Distrital de Sarayacu	Operativo	San Ramón	62	2.5	96	16
Loreto	Andoas Viejo	Andoas Viejo	Localidad de Andoas Viejo	Operativo	Andoas Viejo	60	4	120	16
Ucayali	Bufeo Pozo	Bufeo Pozo	Municipalidad Distrital de Sepahua	Inoperativo	Bufeo Pozo	27	3	95	16
Ucayali	Sheboja	Sheboja	Localidad de Sheboja	Inoperativo	Sheboja	6.5	3	22	16
Huanuco	Nueva Unión	Sistema Eléctrico Nueva Unión	Agencia Municipal	Inoperativo	Nueva Unión	15	3	20	15
Huanuco	San Antonio	Sistema Eléctrico San Antonio	Comité de Electrificación	Operativo	San Antonio	15	3	35	15
Huanuco	Santa Teresa	Santa Teresa	Localidad de Santa Teresa	Inoperativo	Santa Teresa	15	3	25	15
Loreto	Panan	Panan	Municipalidad Distrital de Balsapuerto	Operativo	Panan	80	2.5	100	15
Loreto	Jeberos	Jeberos	Municipalidad Distrital de Jeberos	Operativo	Jeberos	251	3.5	419	15
Loreto	San Fernando	San Fernando	Municipalidad distrital de Andoas	Operativo	San Fernando	18	3	32	15
Loreto	Sopin Vargas	Sopin Vargas	Municipalidad Distrital Teniente Manuel Clavero	Operativo	Sopin Vargas	35	4	84	15
Loreto	Santa Elena	Santa Elena	Municipalidad Distrital de El Tigre	Operativo	Santa Elena	33	3	55	15

Fuente : Osinergmin

Departamento	Localidad	Sistema Eléctrico Rural	Propietario Del SER	Estado de la generación	Nombre de la Central	Potencia Instalada (KW)	Horas de Funcionamiento	Numero total de Usuario	Costo de combustible (S/./gl)
Loreto	Fernando Loreo	Electro Loreo	Municipalidad Distrital de Pebas	Inoperativo	Electro Loreo	12	3	22	15
Loreto	Islandia	Islandia	Municipalidad Distrital de Yavarí	Inoperativo	Islandia	344	8	800	15
Loreto	Nuevo Junín	Sistema Eléctrico Nuevo Junín	Municipalidad Distrital de Maquia	Operativo	Nuevo Junín	27.5	3	90	15
Loreto	Obrero I Zona	Sistema Eléctrico de Obrero I Zona	Municipalidad Distrital Maquia	Operativo	Obrero I Zona	38	3	100	15
Loreto	Santa Isabel	Sistema Eléctrico de Santa Isabel	Municipalidad Distrital Maquia	Operativo	Santa Isabel	23	3	35	15
Loreto	Encanto Siuca Caño	Sistema Eléctrico de Encanto Siuca Caño	Municipalidad Distrital Maquia	Inoperativo	Encanto Siuca Caño	36	3	50	15
Loreto	Nuevo Liberal	Sistema Eléctrico de Nuevo Liberal	Municipalidad Distrital Maquia	Operativo	Nuevo Liberal	37.5	3	55	15
Loreto	Mahuizo	Sistema Eléctrico de Mahuizo	Municipalidad Distrital de Sarayacu	Inoperativo	Mahuizo	207	3	105	15
Loreto	Barranquita	Barranquita-Buenos Aires	Municipalidad Distrital de Cahuapanas	Operativo	tranquila - Buenos A	40	2	70	15
Loreto	Santa María Cahuapanas	Santa María de Cahuapanas	Municipalidad Distrital de Cahuapanas	Inoperativo	anta María Cahuapan	80.4	3	120	15
Loreto	Ungumayo	Sistema Eléctrico Ungumayo	DGER-MEM	Operativo	Ungumayo	13	2	42	15
Loreto	Recreo	Sistema Eléctrico Recreo	DGER-MEM	Operativo	Recreo	13	2	35	15
Loreto	Huagramona	Huagramona	Municipalidad Distrital de Andoas	Operativo	Huagramona	28.5	3	35	15
Ucayali	Bolognesi	Bolognesi	Municipalidad Distrital de Tahuania	Operativo	Bolognesi	410	7	390	15
Ucayali	09 de Octubre	09 de Octubre	Municipalidad Distrital de Tahuania	Inoperativo	09 de Octubre	28	3	43	15
Ucayali	Señor de los Milagros	Señor de los Milagros	Municipalidad Distrital de Tahuania	Operativo	Señor de los Milagro	15.5	3	35	15
Ucayali	Naranjal	Naranjal	Agencia Municipal	Inoperativo	Naranja	16	2	35	15
Ucayali	Nueva Unión Progreso	Nueva Unión Progreso	Agencia Municipal	Operativo	Nueva Unión Progres	18	3	34	15
Ucayali	Santa Rosa de Dinamarca	Santa Rosa de Dinamarca	Municipalidad Distrital de Masisa	Operativo	anta Rosa de Dinama	60	3	150	15
Ucayali	Progreso	Progreso	Municipalidad Distrital de Masisa	Operativo	Progreso	23	3	30	15
Ucayali	Vista Alegre del Pachitea	Vista Alegre del Pachitea	Municipalidad Distrital de Masisa	Operativo	ista Alegre del Pachit	23	2	50	15
Loreto	Tamarate	Tamarate	Municipalidad Distrital de Lagunas	Operativo	Tamarate	50	2.5	33	14
Loreto	Providencia	Providencia	Municipalidad Provincial Ato Amazonas	Inoperativo	Providencia	60	2	130	14
Loreto	Santa María	Santa María	Comité de Electrificación Santa María	Inoperativa	Santa María	60	2	110	14
Loreto	Ipuano	Ipuano	Municipalidad Distrital de Inahuaya	Operativo	Ipuano	15	3	40	14
Loreto	Santa Rosa de Pirococha	Santa Rosa de Pirococha	Municipalidad Distrital de Inahuaya	Operativo	Santa Rosa de Pirococha	15	3	25	14
Loreto	Alianza	Alianza	Municipalidad Provincial de Loreto	Operativo	Alianza	2.8	3	28	14
Loreto	Santa Clara	Santa Clara	Municipalidad Distrital de El Tigre	Operativo	Santa Clara	12	3	26	14
Loreto	Santos de Suni	Sistema Eléctrico Santos de Suni	Municipalidad Provincial de Mariscal Ramón Castilla	Operativo	Santos de Suni	7	3	23	14
Loreto	Perfita	Sistema Eléctrico de Perfita	Municipalidad Distrital Emilio San Martín	Inoperativo	Perfita	24	0	56	14
Loreto	Shenoval	Sistema Eléctrico de Shenoval	Municipalidad Distrital Emilio San Martín	Inoperativo	Shenoval	27.2	3	60	14
Loreto	28 de Julio	Sistema Eléctrico de 28 de Julio	Municipalidad Distrital Emilio San Martín	Operativo	28 de Julio	24	2.5	76	14
Loreto	Puri Isla	Sistema Eléctrico de Puri Isla	Municipalidad Distrital de Maquia	Operativo	Puri Isla	15	3	65	14
Loreto	Nuevo Trujillo	Sistema Eléctrico de Nuevo Trujillo	Municipalidad Distrital de Maquia	Inoperativo	Nuevo Trujillo	18	3	42	14
Loreto	Polo Sur	Sistema Eléctrico Polo Sur	Municipalidad Distrital de Maquia	Operativo	Polo Sur	13.5	3	56	14
Loreto	Restauración	Sistema Eléctrico de Restauración	Municipalidad Distrital Maquia	Operativo	Restauración	30	2.5	55	14
Loreto	Bolívar	Sistema Eléctrico de Bolívar	Municipalidad Distrital Maquia	Operativo	Bolívar	27.5	3	38	14
Loreto	Capitán Clavero	Sistema Eléctrico de Capitán Clavero	Municipalidad Distrital Maquia	Operativo	Capitán Clavero	23	3	30	14
Loreto	Obrero II Zona	Sistema Eléctrico de Obrero II Zona	Municipalidad Distrital Maquia	Inoperativo	Obrero II Zona	24	3.5	34	14
Loreto	Nuevo Encanto	Sistema Eléctrico Nuevo Encanto	Municipalidad Distrital Maquia	Operativo	Nuevo Encanto	24	3	40	14

Fuente: Osinergmin

Anexo N° 5: Matriz de Consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIAS DE LA TESIS

Título del Proyecto: "VIABILIDAD DEL USO DE CELDAS FOTOVOLTAICAS EN ZONAS RURALES AISLADAS DE ALTA DENSIDAD"				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODOS
<p>General</p> <p>¿De qué manera la viabilidad en la Implementación de Celdas Fotovoltaicas en zonas Rurales de Alta Densidad como generación eléctrica complementaria puede contribuir a mejorar la calidad de vida y contribuye al desarrollo de centros poblados que tienen restricción en el suministro eléctrico?</p> <p>Específico</p> <p>a.- ¿En qué medida la viabilidad en la Implementación de Celdas Fotovoltaicas en Zonas Rurales de Alta Densidad como generación complementaria pueden disminuir los altos costos de generación eléctrica?</p> <p>b.- ¿En qué medida la viabilidad en la Implementación de Celdas Fotovoltaicas en Zonas Rurales de Alta Densidad como generación eléctrica complementaria pueden disminuir las altas Tarifas Eléctricas en centros poblados con generación térmica?</p> <p>c.- ¿Cuál es el efecto en el Medio Ambiente por la Implementación de Celdas Fotovoltaicas en Zonas Rurales de alta Densidad para la generación de energía eléctrica?</p>	<p>General</p> <p>Demostrar que la viabilidad en la Implementación de Celdas Fotovoltaicas en Zonas rurales de Alta Densidad como fuente de suministro de energía eléctrica complementaria mejora la calidad de vida y contribuye al desarrollo de los centros poblados que cuentan con restricciones de suministro eléctrico.</p> <p>Específicos</p> <p>a. Demostrar que la implementación de Celdas Fotovoltaicas como generación complementaria disminuyen los altos costos de generación.</p> <p>b. Demostrar que la Implementación de Celdas Fotovoltaicas en Zonas Rurales de alta Densidad como generación eléctrica complementaria disminuyen las tarifas eléctricas en centro poblados con generación térmica.</p> <p>c. Evaluar el Efecto en el Medio Ambiente de la Implementación de Celdas Fotovoltaicas como fuente de generación eléctrica complementaria en zonas rurales de alta densidad.</p>	<p>General</p> <p>La viabilidad en la implementación de Sistemas Fotovoltaicos Distribuidos en localidades rurales aisladas de alta densidad con restricción en el suministro eléctrico, mejoran la calidad de vida y contribuyen al desarrollo de los centros poblados.</p> <p>Específicas</p> <p>a.- La implementación de Celdas Fotovoltaicas como generación complementaria disminuyen los costos de generación eléctrica</p> <p>b,. La implementación de Celdas fotovoltaicas reducen las tarifas eléctricas en los centros poblados con fuerte presencia de generación térmica,</p> <p>c,. La implementación de Celdas fotovoltaicas como fuente de generación complementaria disminuye la contaminación ambiental.</p>	<p>Variables de la Investigación:</p> <p>Variable independiente: Implementación de sistemas fotovoltaicos.</p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la contaminación ambiental • Costos de inversión de sistemas fotovoltaicos • Costos de O y M de sistemas fotovoltaicos • Costos de la generación térmica actual • Tarifas de sistemas aislados • Radiación solar zonas de trabajo <p>Variable dependiente</p> <p>Mejora de la calidad de vida de los usuarios.</p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumento de consumo de electricidad • Disminución de la Emisión del CO2 	<p>Tipo de Investigación:</p> <p>a).- Aplicativa: A través de este método conoceremos la conveniencia o no de aplicar estos sistemas como alternativas de diversificación de suministro eléctrico en las zonas aisladas con fuerte presencia de la generación térmica.</p> <p>b) Descriptiva: Se selecciona una serie de cuestiones para describir y analizar el problema</p> <p>Nivel de la Investigación</p> <p>Debe ser entendida como una investigación básica y que servirá de soporte para futuras investigaciones</p> <p>Método de la Investigación</p> <p>El método aplicado a nuestro caso es del tipo deductivo y comparativo.</p>