



Máster En Redes De Telecomunicaciones Para Países En  
Desarrollo.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN.**

**PROYECTO FIN DE MÁSTER.**

*Optimización de los sistemas de electrificación autónomos para  
aplicaciones de telecomunicaciones rurales*

**Gustavo Silva**

**Tutor Dr. Julio Ramiro Bargeño**

**Curso Académico 2009/2010**

Alumno:

Titulación:

Título del Proyecto:

¿Es el proyecto resultado de Prácticas en empresas? SI / NO

Tutor:

Co-Tutor (en caso de que exista):

**TRIBUNAL**

Presidente:

Vocal:

Secretario:

**CALIFICACIÓN DETALLADA DEL PROYECTO**

	Presidente	Vocal	Secretario
<b>Presentación escrita (MB-B-R-M-MM)</b>			
<b>Presentación oral (MB-B-R-M-MM)</b>			
<b>Complejidad técnica (MB-B-R-M-MM)</b>			
<b>Metodología empleada (MB-B-R-M-MM)</b>			
<b>Resultados Obtenidos (MB-B-R-M-MM)</b>			
<b>Esfuerzo realizado (MB-B-R-M-MM)</b>			

**CALIFICACIÓN FINAL DEL PROYECTO**

(nota numérica)	<b>SB / NOT / AP / SS / NP</b> Enmarcar la calificación alcanzada
-----------------	--

PROYECTO PROPUESTO PARA MATRÍCULA DE HONOR: SÍ / NO

(Sólo si la nota numérica final es igual a 10).

Fuenlabrada, de de 20\_\_

El Presidente

El Vocal

El Secretario

## **AGRADECIMIENTOS.**

---

En primer lugar a Dios por darme la fortaleza, por estar siempre a mi lado, por oír mis oraciones y por ayudarme en todo momento.

A mi esposa Nina por ser la mano que me impulsa cada día a seguir adelante, mi apoyo en los momentos de amargura, mi amiga en la soledad y la tristeza, mi confidente y asesora ante cualquier duda, por estar a mi lado todos estos años, por eso y por mucho mas.

A mi pequeño Diego, por ser mi luz y mi alegría y mi razón de seguir. Te amo hijo eres mi luz, mi bendición y este triunfo es por ti.

Gracias a Julio Ramiro, tutor académico, por haber confiado en mí y porque ha sido pieza fundamental para la consecución de esta etapa tan importante dentro de mi desarrollo profesional y académico.

A todos Muchas gracias.

## **RESUMEN.**

---

Con el pasar de los años se ha venido presentando un gran avance en torno a la energía solar fotovoltaica y en especial en el campo de los sistemas de electrificación autónomos. La evolución tecnológica de los elementos que los componen, está en continua evolución y mejora. Esto se debe entre otras razones, al interés y la disposición de gobiernos, empresa privada y organismos de cooperación internacional de buscar alternativas eficientes a los medios tradicionales de generación de energía eléctrica. Los proyectos e iniciativas que necesitan la utilización de sistemas autónomos son generalmente desplegados en zonas rurales dispersas, donde las particularidades de cada entorno, la escasez de recursos económicos y la carencia de redes eléctricas convencionales, representan un desafío constante.

Estos proyectos por lo general, tienen como norte mejorar la calidad de vida de los habitantes de estos lugares y suelen estar muy ligados a las tecnologías de información y comunicación para el desarrollo (TIC4D). Los despliegues de este tipo de proyectos permiten dar acceso y cobertura a servicios tan importantes como la telefonía rural, internet, comunicaciones de centros de salud, medios de información y comunicación, educación y radios comunitarias, entre otros. Con esto, se aportan mejoras significativas a las condiciones básicas de estas poblaciones.

Sin embargo, el despliegue de soluciones tecnológicas en estos entornos requiere la superación de importantes desafíos, entre otros, la utilización de equipamiento y tecnologías específicas, que permitan soportar las condiciones extremas a las que deben estar expuestas durante su operación.

Así mismo, es determinante la gestión y el mantenimiento de estas soluciones para obtener un alto rendimiento y un funcionamiento óptimo. Es en este punto donde se nos plantean las problemáticas que se pretenden resolver con esta investigación. Se ha constatado que los sistemas de electrificación autónomos de los proyectos de telecomunicaciones en estas zonas, presentan diversas carencias que no se han resuelto hasta la actualidad en su totalidad, lo que incide considerablemente en el rendimiento de los sistemas. En este trabajo de investigación, se presentan diversas soluciones que permitirán la optimización de estos sistemas mejorando así el rendimiento de los proyectos que se despliegan en estos entornos.

## **ABSTRACT.**

---

It is obvious that with the passing of the years has been presenting a breakthrough about photovoltaic solar energy especially in the field of autonomous photovoltaic electrification systems. The technological evolutions of the elements that compose it, is continually improving and increasingly are being made new and more significant progress in this area. This is because among other reasons, the interest and willingness from governments, private companies and international aid agencies to seek effective alternatives to traditional means of power generation. Projects and initiatives that need the use of autonomous systems are usually deployed in remote rural areas, where the particularities of each environment, the scarcity of financial resources and lack of conventional power grids, are a constant challenge.

These projects usually have as north to improve the quality of life of the inhabitants of these villages and generally tend to be closely linked to information and communication technologies for development. The deployment of such projects can provide access and coverage to important services such as rural telephony, internet, health centres, communications, media and communication, education, community radios, among others. With this, they provide significant improvements in basic conditions of these populations and in turn, contribute to its development. But the job of deploying technological solutions in these environments require overcoming major challenges, since it is necessary to use equipment specific technologies, enabling withstand the extreme conditions that must be exposed during operation.

In addition, it is necessary to manage and to maintain these solutions to obtain a high performance and an optimal operation. It is at this point we face the problems that we intend to solve with this research, as autonomous electrification systems that provide energy for the solutions deployed as part of projects in these areas, have several shortcomings which, for various reasons not have been solved so far in its entirety and significant impact on the performance of these projects. In conducting this investigation, we will offer various solutions to the optimization of these systems and thereby improve performance levels of technology solutions currently deployed projects in these areas and to come.

## ÍNDICE DE CONTENIDO.

---

1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1. Marco teórico. ....	11
1.2. Planteamiento del problema. ....	40
1.3. Objetivos. ....	51
1.4. Límites y alcances. ....	52
2. MATERIALES Y MÉTODOS. ....	54
2.1. Materiales. ....	54
2.2. Métodos. ....	54
3. RESULTADOS. ....	56
3.1. Propuestas generales para la optimización. ....	56
3.2. Propuestas específicas. ....	78
4. CONCLUSIONES. ....	96
5. LOGROS PRINCIPALES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN. ....	97
5.1. Logros principales. ....	97
5.2. Líneas futuras de investigación. ....	97
6. BIBLIOGRAFÍA. ....	99
6.1. Sitios WEB: ....	101
7. APÉNDICES. ....	102

## ÍNDICE DE FIGURAS.

---

Figura 1. Representación grafica de un sistema de electrificación autónomo [JRCSR].....	11
Figura 2. Datos personas sin acceso a la electricidad [IDH-PNUD]. .....	12
Figura 3. Panel de silicio mono-cristalino.....	14
Figura 4. Panel de silicio poli-cristalino.....	15
Figura 5. Panel de silicio amorfo y esquema explicativo de obtención de energía.....	16
Figura 6. Célula Thin film [WEB-SOLUCAR]. .....	17
Figura 7. Panel de Teluro de cadmio [WEB-SOLUCAR].....	17
Figura 8. Paneles Tándem [WEB-SOLUCAR].....	18
Figura 9. Diferentes tipos de baterías.....	19
Figura 10. Distintos tipos de reguladores presentes en el mercado. ....	21
Figura 11. Distintos inversores en el mercado actual.....	22
Figura 12. Mapa de radiación de Europa, en rojo las áreas de mayor radiación solar [JRCSR]. ..	29
Figura 13. Mercado mundial de generación de energía solar fotovoltaica. [IAASIF].....	30
Figura 14. Irradiación solar en el territorio Español, mas rojo mayor irradiación [WEB-JRC]. ...	31
Figura 15. Mapa de radiación África, en rojo las áreas de mayor radiación solar [WEB-RCSR].	32
Figura 16. Mapa de radiación solar del Perú [WEB-MINEM-PE].....	33
Figura 17. Producción mundial de Paneles fotovoltaicos [JRCSR].....	36
Figura 18. Evolución del rendimiento de las células fotovoltaicas [IAASIF]. .....	37
Figura 19. Evolución del consumo de Silicio por Wp [IAASIF].....	37
Figura 20. Evolución prevista del mercado [IAASIF]. .....	40
Figura 21. Perspectivas de capacidad de producción [IAASIF]. .....	40
Figura 22. Diagrama de fallos de el modulo fotovoltaico, [TDPD].....	42
Figura 23. Casos de fallos en la fase de sombreado e instalación defectuosa [TDPD]. .....	42

Figura 24. Diagrama de fallos de la batería [TDPD]. .....	43
Figura 25. Fallos comunes en mantenimiento e instalación de baterías. ....	44
Figura 26. Puenteo al regulador en instalación en Bolivia [TDPD]......	45
Figura 27. Utilidades del inversor. ....	46
Figura 28. Diagrama de fallos del cableado [TDPD]......	47
Figura 29. Esquema de red de un proyecto desplegado por Ingenova Consulting SLU.....	48
Figura 30. Esquema de la red EHAS-ALIS y Willay Cuzco [APRWC]. ....	49
Figura 31. Distribución de pérdida de potencia anual en módulos, después de 18 años de operación [TDPD]. .....	61
Figura 32. Grafica comparativa de módulos poli-cristalinos. ....	63
Figura 33. Evolución temporal de pérdidas de baterías en operación [TDPD]......	68
Figura 34. Diferentes formas de ondas que ofrecen los inversores.....	77
Figura 35. Diagrama de Gantt para la propuesta del plan de mantenimiento. ....	84
Figura 36. Parámetros medibles del sistema. ....	86
Figura 37. Diagrama de operación del sistema de monitorización. ....	88
Figura 38. Sensores inalámbricos.....	92

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla I. Cantidad aproximada de instalaciones fotovoltaicas domésticas, por países, al año 2007 [TDPD].....	13
Tabla II. Características de las distintas tecnologías fotovoltaicas [IAASIF].....	39
Tabla III. Datos sobre fallas en módulos fotovoltaicos.....	59
Tabla IV. Datos sobre potencia inicial en módulos fotovoltaicos.....	60
Tabla V. Datos sobre las pérdidas de potencia por degradación en módulos fotovoltaicos. ....	60
Tabla VI. Datos sobre la rotura de módulos en operación [TDPD].....	61
Tabla VII. Comparativa de módulos más usados actualmente [WEB-RPM]. ....	62
Tabla VIII. Comparación entre tecnologías de módulos fotovoltaicos [IAASIF]. ....	64
Tabla IX. Datos sobre tiempo de operación de las baterías [TDPD]. ....	66
Tabla X. Datos de capacidades iniciales de baterías [TDPD].....	67
Tabla XI. Capacidades de baterías luego de operación prolongada [TDPD].....	67
Tabla XII. Relación entre capacidades de baterías[NTUSFV]. ....	69
Tabla XIII. Parámetros de PDM <sub>ax</sub> (%) en baterías [NTUSFV]. ....	69
Tabla XIV. Representación de la vida de algunas baterías según el NOC [NTUSFV]. ....	69
Tabla XV. Cuadro comparativo de baterías [WEB-KWP]. ....	70
Tabla XVI. Comparativa entre baterías de plomo ácido sellado y de Ni-Cd [WEB-VHZ].....	71
Tabla XVII. Datos de fallos en reguladores de carga en operación [TDPD].....	72
Tabla XVIII. Estimaciones de fallo en varios diseños de regulador [TDPD].....	72
Tabla XIX. Algunas normativas sobre la regulación del consumo en reguladores [TDPD]. ....	73
Tabla XX. Publicaciones hechas y en desarrollo para sistemas de electrificación autónomos [TDPD].....	74
Tabla XXI. Ensayos de fiabilidad a inversores de diversos fabricantes [TDMJ]. ....	75

Tabla XXII. Datos de fallos en inversores en operación en instalaciones de EHAS.....	76
Tabla XXIII. Comparación de inversores [WEB-STTS]. .....	77
Tabla XXIV. Datos encontrados sobre el mantenimiento de instalaciones de electrificación autónomas [TDPD]. .....	80
Tabla XXV. Proporción de repuestos en almacén recomendados para proyectos de electrificación rural [TDPD]. .....	81
Tabla XXVI. Parámetros a medir en la herramienta de monitorización. ....	87
Tabla XXVII, Propuesta de magnitudes a ser medidas en el sistema autónomo. ....	91
Tabla XXVIII consumo de la CPU del PLC. ....	93

# 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de electrificación autónomos utilizados en aplicaciones de telecomunicaciones, representan una herramienta muy importante en los proyectos de cooperación al desarrollo, ya que además de los beneficios incalculables que generan, han resultado ser un método muy eficaz, no invasivo y ampliamente limpio que se ha ganado una inmensa aceptación social. Aunque actualmente el número de “kilovatios fotovoltaicos” instalados por persona continúe siendo mucho menor que el número de kilovatios proveniente de fuentes tradicionales de energías, su continuo auge y desarrollo está fuera de toda duda.

Desde un principio, la electrificación fotovoltaica y en especial la del ámbito rural, se ha basado en la utilización de sistemas fotovoltaicos individuales. La tecnología ha ido evolucionando, hasta el punto de que hoy en día es posible usar este tipo de sistemas, no solo en la electrificación de los dispositivos eléctricos de los hogares rurales, sino también en la alimentación eléctrica de sistemas de telecomunicaciones complejos.

El incremento del número de proyectos donde las TICs y los sistemas de electrificación autónomos son parte fundamental, han traído consigo la gestión y el mantenimiento de los mismos para garantizar y optimizar su operatividad, pero con esto, se ha evidenciado que la gestión y el mantenimiento se han dirigido más hacia el área de soluciones de telecomunicaciones, que hacia el bloque de generación de energía, aún sabiendo que el óptimo funcionamiento de los sistemas de generación eléctrica, garantizan la operatividad tanto de la solución de telecomunicaciones como del proyecto en general.

El hecho de no tomar con especial atención la gestión, funcionamiento y mantenimiento del sistema de electrificación autónomo, limita de manera clara la vida útil del sistema de telecomunicaciones, a pesar de que presente una operatividad eficiente en sus inicios, esto afecta seriamente al desarrollo del proyecto planteado.

A través del presente trabajo se ha desarrollado un compendio de soluciones dirigidas a la consecución de avances significativos en materias de operación, gestión y mantenimiento de los sistemas de electrificación autónomos y sus componentes, así como también, se establecen propuestas para la mejora de la fiabilidad en sus diversas aplicaciones, pretendiendo lograr con

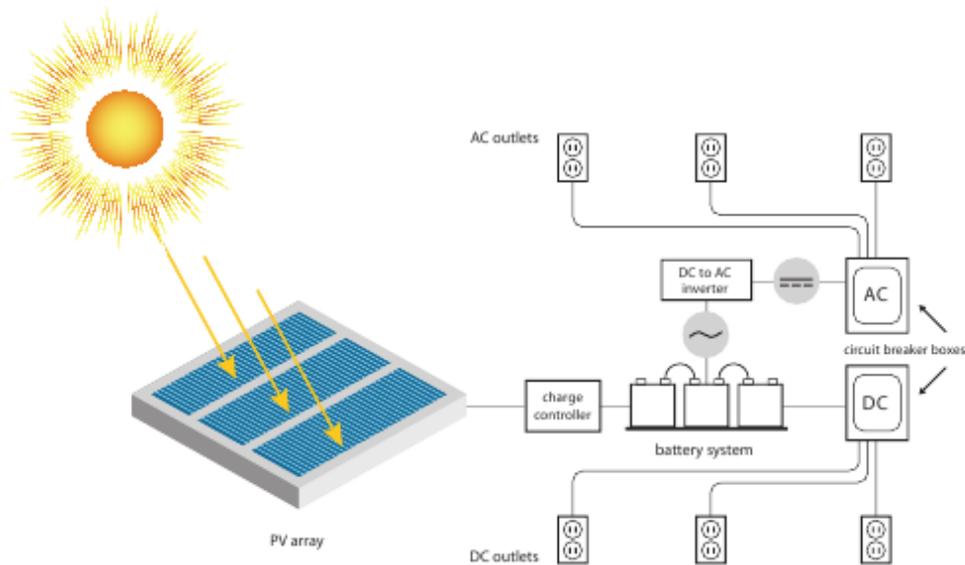
esto la optimización de los sistemas de electrificación autónomos utilizados en aplicaciones de telecomunicaciones rurales.

## 1.1. Marco teórico.

### 1.1.1. Descripción general del sistema.

Un sistema de electrificación autónomo es la unión de diversos elementos que permiten el abastecimiento de energía para el funcionamiento de equipos de diversas índoles por un período determinado de tiempo. Comúnmente son considerados como una alternativa a las soluciones tradicionales de generación energía y además son reconocidos como grandes impulsores de las energías alternativas en zonas aisladas donde el suministro tradicional no llega.

Estos sistemas están compuestos por elementos: de producción, regulación, almacenamiento inversión y conducción de energía a través de fuentes renovables. Para nuestro proyecto de investigación no centraremos específicamente en los sistemas de electrificación autónomos, que son utilizados como fuente de alimentación para soluciones de TIC4D. La figura 1 muestra el sistema autónomo y sus componentes básicos.



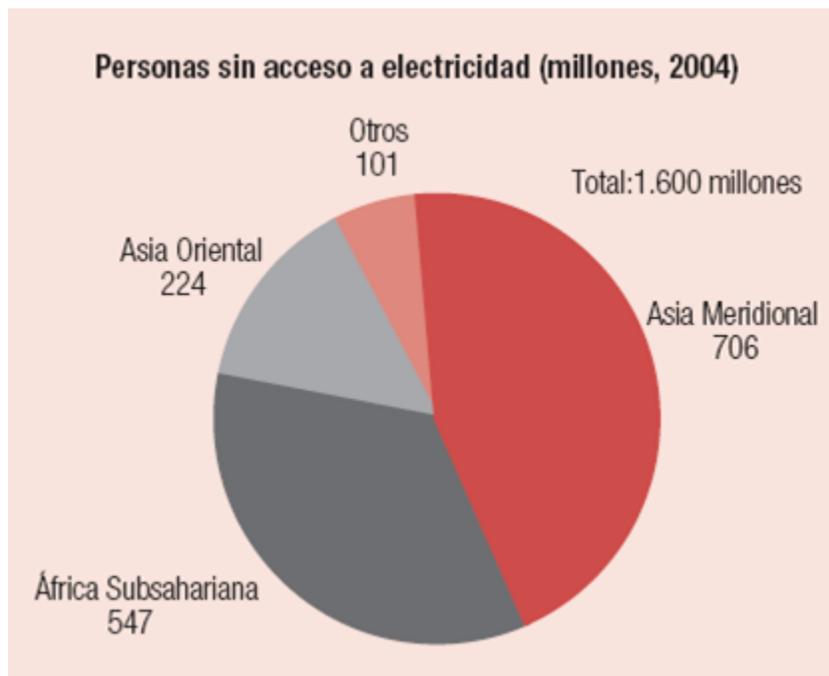
*Figura 1. Representación grafica de un sistema de electrificación autónomo [JRCSR].*

Para acercarnos más al contexto de los sistemas de electrificación autónomos, en específico, los del área de la fotovoltaica, es preciso describir el sistema y cada uno de los componentes que lo

conforman, ahondando lo más ampliamente posible en las características de cada uno de estos componentes.

Es importante destacar, que una de las principales motivaciones de la instalación de estos sistemas en estos lugares, no tendría como objetivo modificar el origen de la electricidad que transporta la red convencional, sino más bien, complementar la actuación de ésta mediante los sistemas autónomos, para alcanzar las zonas donde, por diversos motivos no ha llegado la red ni existen planes para su llegada en un futuro cercano.

Como se muestra en la figura 2, aun existen desafíos por cumplir en este ámbito ya que existe una gran cantidad de personas, muchas de ellas en comunidades y zonas rurales, que no poseen soluciones de energía eléctrica.



*Figura 2. Datos personas sin acceso a la electricidad [IDH-PNUD].*

Los sistemas de electrificación autónomos están actualmente considerados como una tecnología muy madura y como la opción principal para dotar de acceso a la electricidad a las zonas.

Hoy estos sistemas representan un factor fundamental para el despliegue de proyectos de telecomunicaciones en zonas donde no llegan las redes eléctricas convencionales.

El uso de la energía fotovoltaica para este tipo de aplicaciones aisladas de la red permite aprovechar algunas de sus características más ventajosas, como son la disponibilidad de una fuente de energía libre y gratuita en el mismo lugar del consumo, la flexibilidad y la modularidad de estas instalaciones y la amplia autonomía que estos sistemas proporcionan. Las estimaciones indican que en el año 2000 existían en operación, en todo el mundo, 1.300.000 sistemas fotovoltaicos domésticos, aproximadamente, totalizando unos 40 MWp<sup>1</sup> con una extensa distribución, como se muestra en la Tabla I.

País	Numero de Sistemas de electrificación autónomos(en miles)
China	285
Kenia	150
India	118
México	90
Indonesia	80
Zimbawe	80
Sudáfrica	60
Marruecos	50
República Dominicana	10
Resto del mundo	375

*Tabla I. Cantidad aproximada de instalaciones fotovoltaicas domésticas, por países, al año 2007 [TDPD].*

A continuación, detallaremos los componentes del sistema de electrificación autónomo.

#### **1.1.1.1 Módulos.**

El funcionamiento de este elemento se basa en el efecto fotovoltaico. Este efecto se produce cuando sobre materiales semiconductores convenientemente tratados incide la radiación solar produciéndose electricidad. Cuando el conjunto de estos materiales queda expuesto a la radiación solar, los fotones contenidos en la luz transmiten su energía a los electrones que pueden entonces romper la barrera de potencial de la unión P-N<sup>2</sup> y salir del semiconductor a través de un circuito exterior, produciéndose así corriente eléctrica. Existen varias tecnologías en la manufactura de las

---

<sup>1</sup> Mega vatios pico

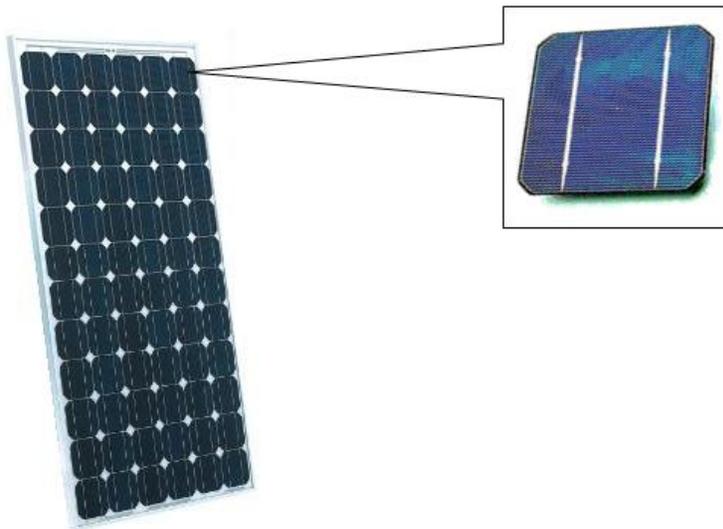
<sup>2</sup> estructura fundamental de los componentes electrónicos comúnmente denominados semiconductores

células que componen los módulos solares. La más común utiliza como material el silicio cristalino, en sus variedades de mono-cristalino o poli-cristalino. También se encuentra disponible la que hace uso del silicio amorfo como material semiconductor. Existen así mismo, diferentes tipos de paneles solares en función de los materiales semiconductores y los métodos de fabricación que se empleen.

Algunos de los tipos de paneles solares más significativos que pueden encontrarse en el mercado actual son los siguientes.

- **Silicio puro mono-cristalino.**

La mayoría de las células actualmente en el mercado son mono-cristalinas. En el proceso de fabricación el silicio se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes. Los lingotes son cortados en finas obleas para hacer células individuales. Las células mono-cristalinas tienen un color uniforme, generalmente azul o negro. Se obtienen al realizar secciones o cortes de una barra de silicio mono-cristalino crecido en una sola pieza. En laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7%, para éste tipo de paneles, aunque los valores encontrados en el mercado rondan el 16% [SSDC].

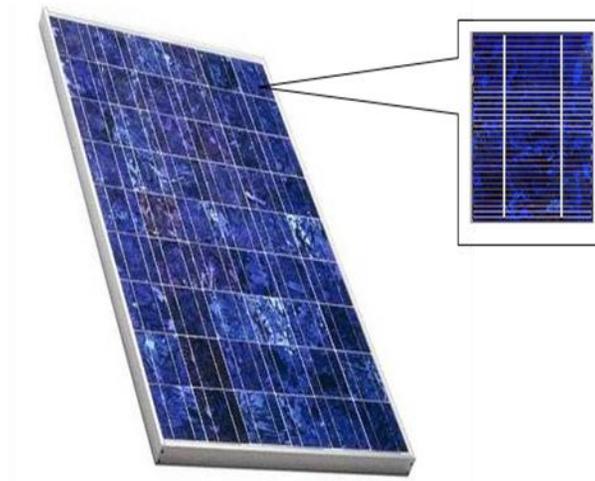


*Figura 3. Panel de silicio mono-cristalino.*

- **Silicio poli-cristalino.**

Los materiales con los que se realiza, son semejantes a los del tipo anterior, aunque en este caso el proceso de cristalización del silicio es diferente. Son visualmente muy reconocibles por presentar su superficie un aspecto granulado. Se obtiene con ellos un rendimiento inferior que con los mono-cristalinos (en laboratorio del 19.8% y en los módulos comerciales del 14%) siendo su precio también más competitivo que el de los mono-cristalinos [SSDC].

Las células poli-cristalinas se fabrican de forma similar a las mono-cristalinas. La principal diferencia es que se utiliza un silicio de menor coste y calidad. Este hecho se traduce en una reducción en la eficiencia, aunque los fabricantes defienden que el precio por Kw es menor. La superficie de las células poli-cristalinas tiene un patrón aleatorio de cristalización en lugar del color homogéneo de las células mono-cristalinas.



*Figura 4. Panel de silicio poli-cristalino.*

- **Silicio amorfo.**

Están basados también en el silicio, pero a diferencia de los dos anteriores, este material no sigue aquí estructura cristalina alguna. Su rendimiento máximo alcanzado en laboratorio ha sido del 14% siendo el de los módulos comerciales del 8 al 10% [SSDC]. El silicio amorfo ofrece un coeficiente de absorción mayor que el cristalino en el espectro visible. De esta forma, el espesor de silicio amorfo puede ser menor de 1 mm. Generalmente la célula amorfa consiste en una unión

p-i-n (o n-i-p): una capa transparente de TCO<sup>3</sup> en la parte frontal y una capa metálica como contacto y reflector trasero.

Las células de silicio amorfo pueden fabricarse a una temperatura relativamente baja, generalmente entre 200-500 °C<sup>4</sup>, lo que permite el uso de varios sustratos de bajo coste. Como desventaja podemos mencionar que el silicio amorfo sufre una ligera degradación debido a la luz al inicio de su operación.

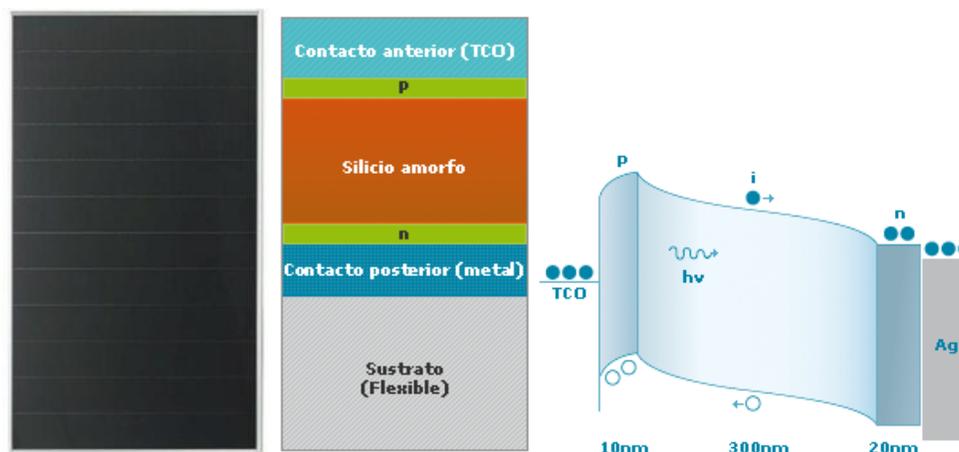


Figura 5. Panel de silicio amorfo y esquema explicativo de obtención de energía.

- **CIGS.**

Es uno de las células finas con mayor potencial debido a su alta eficiencia y bajo coste. Las células CIGS<sup>5</sup> ofrecen el mayor coeficiente de absorción dentro de la tecnología de célula fina, lo que permite que alrededor del 99% de los fotones sean absorbidos por los primeros micrómetros del material. Dentro de sus ventajas, encontramos que implican directamente una importante reducción de costes en materiales y como desventaja, podemos mencionar que su método de fabricación es complicado y con necesidad de inversión importante. Otro problema que se plantea con esta tecnología es la disponibilidad de materiales y la toxicidad de la misma.

---

<sup>3</sup> Óxido conductor transparente

<sup>4</sup> Grados centígrados

<sup>5</sup> Copper indium gallium selenium (CuInGaSe<sub>2</sub>), un material semiconductor compuesto de Cobre, Indio, Galio y Selenio

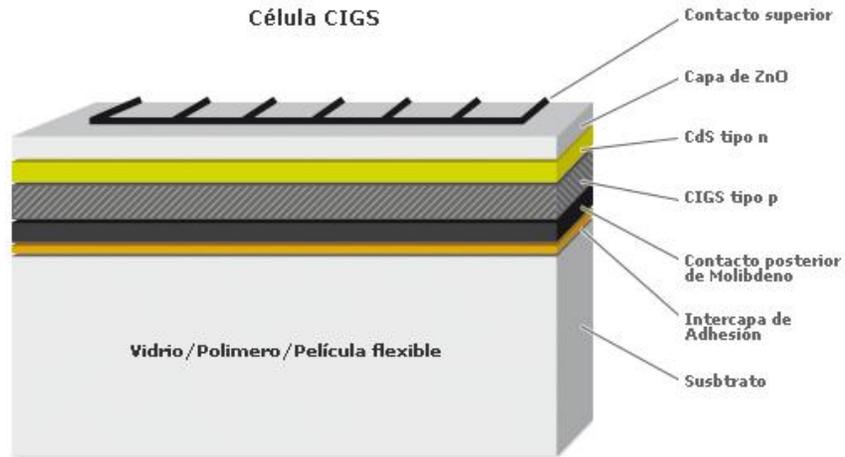


Figura 6. Célula Thin film [WEB-SOLUCAR].

- **Teluro de cadmio.**

Otra de las tecnologías de célula fina que está siendo utilizada últimamente es el Teluro de Cadmio. Una célula típica de Teluro de Cadmio está formada por una capa (tipo p) de Teluro de Cadmio, unida a una fina capa tipo “n” de CdS y finalmente formada por una capa de TCO (generalmente SnO<sub>2</sub>), la cual está conectada con el contacto eléctrico. Se han conseguido rendimientos en laboratorio del 16% y en módulos comerciales 10% [SSDC].

Existen multitud de técnicas para la fabricación de esta tecnología de célula fina, la mayoría de los cuales tiene un gran potencial para producciones a gran escala, aunque aún es muy influyente el coste de los materiales.

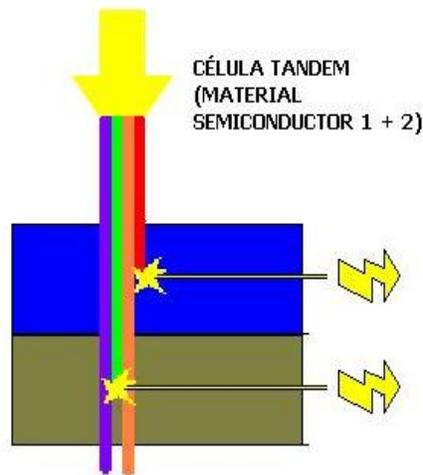


Figura 7. Panel de Teluro de cadmio [WEB-SOLUCAR].

- **Paneles Tándem.**

Combinan dos tipos de materiales semiconductores distintos. Debido a que cada tipo de material aprovecha sólo una parte del espectro electromagnético de la radiación solar, mediante la combinación de dos o tres tipos de materiales es posible aprovechar una mayor parte del mismo. Con este tipo de paneles se ha llegado a lograr rendimientos del 35%. Teóricamente con uniones de tres materiales podría llegarse hasta rendimientos del 50% [SSDC].

A su favor, podemos mencionar que poseen una alta sensibilidad en un amplio rango de longitudes de onda además de sus excelentes tasas de rendimiento. Como desventajas tenemos su elevado coste entre otras cosas debido a su construcción, ya que es necesaria la superposición de dos o más células.



*Figura 8. Paneles Tándem [WEB-SOLUCAR].*

### **1.1.1.2. Baterías.**

Las baterías acumulan la electricidad en forma de energía química y su función prioritaria en un sistema de electrificación autónomo, es la de acumular la energía que se produce durante las horas de luminosidad, para poder ser utilizada en la noche o durante periodos prolongados de mal tiempo. Otra importante función, es la de proveer una intensidad de corriente superior a la que el dispositivo fotovoltaico puede entregar.



*Figura 9. Diferentes tipos de baterías.*

Por su uso en sistemas fotovoltaicos autónomos, las más representativas son las baterías de plomo-ácido con electrolito líquido, estacionarias (tubulares), SLI<sup>6</sup> clásicas, solar modificadas, así como las de electrolito gelificado.

A partir de estas condiciones generales procederemos a describir los tipos de baterías más usados actualmente en la industria.

- **Baterías de plomo - ácido.**

Dentro de esta categoría, las baterías más comunes son las de: plomo-antimonio, plomo-selenio y plomo-calcio. Dentro de las baterías de plomo-ácido, las denominadas estacionarias de bajo contenido de antimonio son una buena opción en sistemas fotovoltaicos, porque ellas poseen unos 2500 ciclos de vida cuando la profundidad de descarga es de un 20 % (es decir que la batería estará con un 80 % de su carga) y unos 1200 ciclos cuando la profundidad de descarga es del 50 % (batería con 50 % de su carga). Las baterías estacionarias poseen además, una baja auto-descarga (3 % mensual aproximadamente contra un 20 % de una batería de plomo ácido convencional) y un reducido mantenimiento. Dentro de estas características se encuadran también las baterías de plomo-calcio y plomo-selenio, que poseen una baja resistencia interna, valores despreciables de gasificación y una baja auto descarga. Lo que caracteriza principalmente a éstas baterías es su bajo coste y el mantenimiento que requieren [TDPD].

---

<sup>6</sup> Baterías solares modificadas

- **Baterías selladas gelificadas.**

Estas baterías incorporan un electrolito del tipo gel con consistencia que puede variar desde un estado muy denso al de consistencia similar a una jalea. Por su composición particular, no sufren derrames permitiendo así ser instaladas en diferentes posiciones. Por el contrario no admiten descargas profundas.

- **Baterías de níquel-cadmio NiCd.**

Las principales características que presentan estas baterías son su composición con electrolitos alcalinos, la admisión de descargas profundas de hasta el 90% de la capacidad nominal, los bajos coeficientes de auto descarga, un alto rendimiento de absorción de carga (mayor al 80 %) y mostrar un rendimiento muy elevado ante variaciones extremas de temperatura.

Como principal desventaja se puede mencionar su coste, notablemente más elevado que el de las baterías ácidas.

Al igual que las baterías de plomo ácido, estas se pueden conseguir en las dos versiones, estándar y selladas, utilizando la más conveniente según la necesidad de mantenimiento admisible para la aplicación prevista. [WEB-EFV].

Tiene un bajo coeficiente de auto-descarga, la carga ronda el 80%. Las celdas tienen por lo general, un voltaje de 1,2 V. Y como se ha mencionado sobre su buen rendimiento a temperaturas extremas, la descarga que admiten se sitúa sobre el 90% de su capacidad nominal [TDPD]. Dado su alto coste, solo se justifica su utilización en aplicaciones rurales donde la masa crítica de sitios de instalación sea elevada y las condiciones geográficas y climatológicas lo exijan. El electrolito que utilizan es un alcalino

### ***1.1.1.3. Regulador.***

El regulador es el elemento que asegura el funcionamiento ideal de la batería en condiciones apropiadas, evitando la sobrecarga y sobre-descarga de la misma, fenómenos ambos muy perjudiciales para la vida de la batería. El procedimiento que utiliza para ello es determinar el estado de carga (SoC, por sus siglas en inglés) de la batería a partir de la tensión a la que ésta se encuentra. El regulador se programa en función de la tecnología de almacenamiento empleada

por la batería, por lo que midiendo la tensión de la batería, determina con exactitud los umbrales precisos a los que desconecta la batería para evitar la sobrecarga o descarga excesiva [TDPD].



*Figura 10. Distintos tipos de reguladores presentes en el mercado.*

El regulador monitorea constantemente la tensión de batería. Cuando dicha tensión alcanza un valor para el cual se considera que la batería se encuentra cargada (aproximadamente 14.1 Voltios para una batería de plomo ácido de 12 Voltios nominales) el regulador interrumpe el proceso de carga. Esto puede lograrlo abriendo el circuito entre los módulos fotovoltaicos y la batería (control tipo serie) o cortocircuitando los módulos fotovoltaicos (control tipo shunt<sup>7</sup>). Cuando el consumo hace que la batería comience a descargarse y por lo tanto a bajar su tensión, el regulador reconecta el generador a la batería y vuelve a comenzar el ciclo.

También existen los reguladores de carga cuya etapa de control opera en dos pasos, la tensión de carga a fondo de la batería puede ser algo mayor a 14,1 Voltios. A partir de esto, podemos mencionar que el regulador quedara definido especificando su nivel de tensión (que coincidirá con el valor de tensión del sistema) y la corriente máxima que deberá manejar.

#### ***1.1.1.4. Inversor.***

Los inversores transforman la corriente continua en corriente alterna. Existen diversos inversores en el mercado, encontrándose entre los más utilizados:

- ***Inversores de onda cuadrada.***

La mayoría de los inversores funcionan haciendo pasar la corriente continua a través de un transformador, alternando el sentido de paso. El dispositivo de conmutación que cambia la dirección de la corriente debe actuar con rapidez. A medida que la corriente pasa a través de la cara primaria del transformador, la polaridad cambia 100 veces cada segundo. Como

---

<sup>7</sup> Carga resistiva a través de la cual se deriva una corriente eléctrica

consecuencia, la corriente que sale del secundario del transformador va alternándose, en una frecuencia de 50 ciclos completos por segundo. Los inversores de onda cuadrada son más baratos, pero normalmente son también los menos eficientes. Producen demasiados armónicos que generan interferencias (ruidos) [TDSL].

- ***Inversores de onda cuadrada modificada.***

Son más sofisticados y caros que los anteriores. Utilizan técnicas de pulso ancho. La tendencia actual indica que dentro de muy poco tiempo el coste de los inversores de onda senoidal se acercará mas al de los otros, popularizándose su instalación y haciendo que aumente su uso en estas instalaciones [TDSL].

- ***Inversores de onda senoidal pura.***

Con una electrónica más elaborada se puede conseguir una onda senoidal pura. Hasta hace poco tiempo estos inversores eran grandes y caros, además de ser poco eficientes (a veces sólo un 40% de eficiencia). Últimamente se han desarrollado nuevos inversores de onda senoidal con una eficiencia del 90% [TDSL].



*Figura 11. Distintos inversores en el mercado actual.*

#### ***1.1.1.5. Cableado y accesorios.***

La transmisión de corriente entre los elementos de generación, almacenamiento y regulación, hacia la carga, debe realizarse de forma efectiva y segura, empleando el cableado adecuado para la potencia de trabajo y las condiciones ambientales previstas. Además, se incluyen fusibles, tomas de corriente, y terminales de conexión [TDPD].

### **1.1.1.6. Carga.**

Como elementos de carga, que atiendan a consumos de energía promedios de una estación de telecomunicaciones, describiremos varios.

Para esto nos hemos basado en información recolectada de distintos proyectos TIC4D en zonas rurales llevados a cabo por diversos organismos de cooperación como la fundación EHAS<sup>8</sup> y el Grupo de Telecomunicaciones Rurales de La Pontificia Universidad Católica del Perú, entre otros. Donde se describen diversos modelos de consumo por estaciones que varían según la tecnología y el tipo de solución [GTRP].

Es necesario destacar que en estos proyectos, en ocasiones se da el caso de realizar una combinación de sistemas en una misma estación. Por ejemplo, es típico y deseable (para que los usuarios tengan acceso a los servicios de la red) que haya sistemas cliente en todas las estaciones. También suele ocurrir que coexistan sistemas de voz y datos. La concurrencia de estos sistemas en una misma locación sugiere el uso de sistemas comunes de energía adaptados a estas especificaciones. A continuación describiremos los diferentes modelos [GTRP].

- **Estación cliente VHF/HF/WiFi.**

Las cargas consideradas en las estaciones de este tipo son:

- Un transceptor de radio VHF para voz y para datos con las siguientes necesidades de consumo: 100 W para transmisión, 5.3 W para recepción, y 5.5 h encendido con un consumo de 3.2 W. Todo esto a 13.6 V DC.
- Una interfaz PC-radio, con un consumo aproximado de 4 W siempre encendida.
- Una computadora con placa alimentada con 13.6 V DC, con un consumo máximo de 30 W, considerando una utilización media diaria de 3.5 h. Una computadora convencional con un inversor consume aproximadamente 60 W.
- Un monitor LCD TFT de 25 W encendido aproximadamente 3.5 h diarias.
- Una impresora de 22 W máximo, encendida 0.5 h diaria.

---

<sup>8</sup> Enlace Hispano Americano de la Salud.

- Dos luminarias de 13 W considerando una utilización media de 4 h diarias (2 h cada una aproximadamente).

La estación cliente HF es prácticamente igual a la anterior con la modificación del tipo de radio, que tiene prácticamente el mismo consumo. La estación cliente WiFi es exactamente igual a la estación cliente VHF, con la única diferencia que no tiene radio VHF y en su lugar tiene un enrutador WiFi de un consumo medio de 5 W, pero que debe estar encendido las 24 h del día.

- **Estación Pasarela VHF/HF/WiFi.**

Las cargas generalmente consideradas para este modelo son

- Una computadora alimentada con un transformador, que debe estar encendida 12 h.
- Un transceptor de radio igual a la de la estación cliente, encendida 12 h, de las cuales 4 h transmite y 4 h recibe.
- Repetidor de Voz VHF. En este caso, la carga la constituyen las dos radios que conforman el repetidor. El repetidor estará disponible las 24 horas al día.

- **Repetidor de datos VHF.**

Consta de una placa de computadora embebida y una radio VHF; disponible las 24 horas al día.

- **Enrutador inalámbrico WiFi.**

Este sistema se emplea en las redes WiFi y básicamente consta de:

- Una placa de computadora de propósito específico que debe funcionar las 24 horas del día para proceder al encaminamiento de todo el tráfico IP tanto de voz como de datos.
- Debe tenerse en cuenta que un repetidor WiFi puede requerir más de un modelo de consumo.

Todos los elementos anteriormente descritos poseen requerimientos de voltaje y corriente particulares, que pueden variar dependiendo del modelo y el fabricante de cada uno, razón importante para tomar en cuenta en el momento de dimensionar el sistema autónomo, por lo que se recomienda que el diseño se haga de adentro hacia afuera. Primero se debe conocer el tipo de

equipamiento que se va a instalar, niveles de potencia que estos requerirán del sistema de electrificación, para posteriormente, dimensionar el sistema autónomo [GTRP].

### **1.1.2. Aplicaciones.**

El desarrollo de proyectos que incluyan los sistemas de electrificación autónomos tiene lugar fundamentalmente en zonas aisladas de países en vías de desarrollo. No obstante también existe una gran potenciación de estos sistemas y tecnologías impulsado por los países desarrollados que cuentan con poblaciones muy dispersas y con posiciones geográficas prometedoras para el abastecimiento de la energía solar (España, Alemania, China, etc.). En este contexto, es precisa la evaluación de las aplicaciones de los sistemas de electrificación autónomos en diversos segmentos.

#### ***1.1.2.1. Aplicaciones de los sistemas de electrificación autónomos para proyectos TIC4D por parte de ONGDs.***

Estos organismos están en continuo desarrollo y en búsqueda de mejoras para dar beneficios y valor añadido a las comunidades rurales que generalmente se encuentran en países del tercer mundo o en vías de desarrollo. Independientemente del objeto de estas ONGDs si existe un factor que reúne gran parte de sus acciones, es la utilización de soluciones TIC4D para llegar a estas comunidades y debido a las particularidades del entorno geográfico donde se encuentran estas comunidades, es preciso que dichas soluciones estén soportadas por sistemas de electrificación autónomos.

Entre las aplicaciones principales que desarrollan estos organismos tenemos las siguientes:

- **Energía eléctrica rural.**

Este tipo de servicios es común en zonas donde las comunidades no cuentan, por lo general, con fuentes de energía tradicionales. Para desarrollar sus funciones, tanto ONGDs como entidades privadas y en algunas ocasiones, gobiernos locales han incrementado la introducción de sistemas de electrificación autónomos, permitiendo así a estas poblaciones, mejorar sus condiciones actuales.

A pesar de esto, es común encontrarse con malas prácticas, donde abundan los deficientes dimensionados del sistema, componentes no aptos o no estandarizados para su uso y la falta de

personal técnico calificado para el mantenimiento y reparación de estos sistemas. En este tipo de aplicaciones es donde más potencial de desarrollo y aportaciones significativas al desarrollo encontramos.

- **Soporte para TIC4D rurales.**

Es común encontrar soluciones TIC4D rurales donde la alimentación de sus sistemas se realiza a través de sistemas de electrificación autónomos. En este tipo de soluciones se le da un tratamiento importante a aspectos determinantes del sistema como la selección de componentes y el dimensionado. Los equipos a los se le suministrará energía necesitan mantener un rendimiento y una fiabilidad constantes y óptimos.

También es común encontrar sistemas de electrificación autónomos que den soporte a soluciones de TIC4D desplegadas por la empresa privada, pero estos están compuestos por dispositivos mucho más sólidos, estandarizados y respaldados por fabricantes y distribuidores locales que permitirán siempre un mejor y mayor rendimiento de estos sistemas [TDSL].

La energía solar fotovoltaica ya es actualmente una de las mejores alternativas para muchas aplicaciones como la televisión, telefonía celular, telefonía rural, sistemas de telemetría, GSM, GPS, aplicaciones militares, etc. Todo esto debido también al incremento que estas soluciones tecnológicas están teniendo en los últimos años y el nivel de demanda del mercado.

#### ***1.1.2.2. Aplicaciones de los sistemas de electrificación autónomos en el modelo privado.***

Las empresas que utilizan estos sistemas están por lo general, enfocadas hacia los sectores o mercados que aún teniendo un potencial de negocio muy importante, se encuentran en zonas dispersas y alejadas de las áreas urbanas.

Generalmente en zonas dispersas dentro de países desarrollados donde es posible contar con unas prestaciones más significativas y es común encontrar que los fabricantes y distribuidores son de ámbito local. Así mismo se cuenta con regulaciones y normativas amparadas por los gobiernos que permiten un mejor aprovechamiento de estos sistemas.

- **Electrificación para bombeo de agua y agricultura.**

Este ha sido un uso para el desarrollo de mucha aportación en el pasado, y todo hace suponer que así seguirá siendo en el futuro, el bombeo de agua (para ambos usos: agua potable y riego) y las aplicaciones agrícolas. En la práctica estas aplicaciones asocian otras necesidades eléctricas: iluminación, motores, maquinas de leche, etc. Por ese motivo, pensamos que es más adecuado adoptar una visión global que considere el conjunto de dichas necesidades, dado que hay que satisfacer las necesidades de la tierra y de las personas que trabajan en ella.

Generalmente esta aplicación se ve como una alternativa a la energía tradicional, por diversos factores (económico, política ambiental, etc.) eso permite que sea común ver despliegues de sistemas de electrificación autónomos en estas zonas para ayudar a la potenciación de estas labores.

- **Protección catódica.**

La protección catódica concierne a las estructuras metálicas en general: puentes, tuberías (bajo tierra o mar). Generalmente estas estructuras son muy caras y es importante prolongar al máximo su tiempo de vida. Para dar una idea de lo que esto representa, se estima que la corrosión destruye el equivalente a  $\frac{1}{4}$  de la producción mundial anual de acero. Este es uno de los muchos casos paradójicos en estos países ya que algunos son grandes productores de gas y de petróleo (Argelia, Colombia, Ecuador, Venezuela, Bolivia) que poseen grandes infraestructuras para sus redes de gasoductos y oleoductos. Muchos km de estas tuberías necesitan protección, lo que representa una potencia fotovoltaica de 2 a 3 MWp.

- **Alternativas para la industria de hostelería.**

Es común encontrarnos con sitios de hostelería y turismo que se encuentran ubicados en zonas aisladas geográficamente de las redes tradicionales de energía. Para ofrecer los servicios ideales a sus huéspedes, estas empresas cuentan con sistemas de electrificación autónomos. Al igual que en el punto anterior, estos sistemas se diferencian por contar con recursos suficientes para mantenimientos y reparaciones. Así mismo es habitual que las vías de comunicación que conectan estos sitios se encuentran en buenas condiciones, lo que permite una fácil actuación en caso de falla o emergencia.

- **Educación / ocio.**

Estas aplicaciones son de evaluación muy incierta porque su generalización pasa por la implantación de incentivos y leyes que, o no existen o se aplican débilmente. Esto proviene de la ausencia de una industria fotovoltaica bien establecida en países en vías de desarrollo.

### **1.1.3. Entornos de acción.**

Como sabemos los sistemas de electrificación autónomos están compuestos por módulos fotovoltaicos, baterías, reguladores, inversores, cableado y cargas. De estos elementos los más susceptibles a su entorno son tanto el modulo fotovoltaico como las baterías o acumuladores. El modulo fotovoltaico genera intensidad de acuerdo a la cantidad de radiación solar que reciba, es por esto que la situación geográfica del entorno se convierte en un factor determinante para su buen desempeño. Así mismo también presenta dependencia con la temperatura del entorno donde se va a instalar. Aumentos de temperatura en las células supone un incremento en la corriente, y una disminución mucho más severa, en proporción, de la tensión. El efecto global es la disminución de la potencia del panel. Siendo así sumamente importante tener en notable consideración la temperatura del lugar donde se va a realizar la instalación del sistema. Este efecto también atañe a las baterías o acumuladores de forma negativa en su rendimiento.

Debido a que nuestra investigación se orienta específicamente hacia la aplicación de estos sistemas a las redes de TIC4D rurales, es importante saber en qué entornos son usualmente utilizados y cómo responden en materia de rendimiento, fiabilidad y eficiencia ante las condiciones de estos.

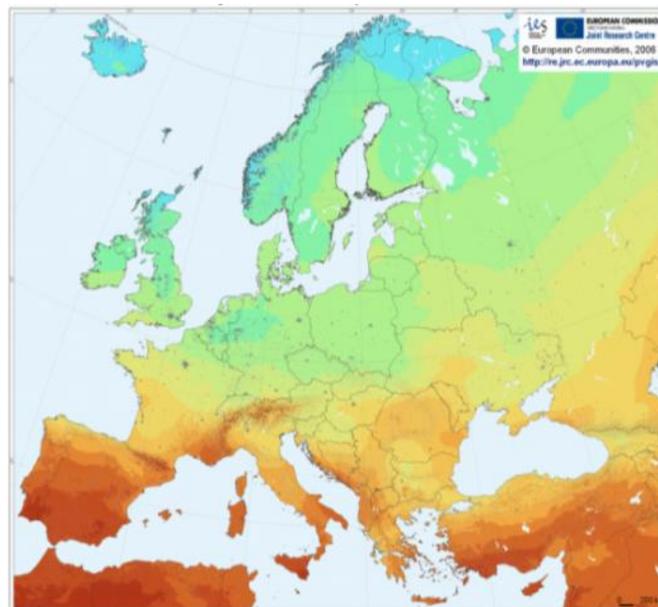
- **Entornos rurales ideales.**

Denominaremos “entornos rurales ideales”, a las zonas donde se encuentren desplegados sistemas de electrificación rural que geográficamente estén en una situación estable para su implantación, gestión y mantenimiento. Entornos donde por lo general, no existan cambios bruscos en las temperaturas y donde las condiciones de la vegetación y la geografía permitan la incursión de personal técnico especializado para cualquier tema relacionado con el sistema de electrificación autónomo.

Generalmente este tipo de entornos los encontraremos en las zonas rurales de países desarrollados, donde la infraestructura, vialidad, transporte, etc. Permiten acceder a ellos dentro de periodos de tiempo razonables.

Los organismos y entidades que poseen sistemas de electrificación autónomos desplegados en estos entornos cuentan además, con una gran presencia de proveedores locales lo que les da acceso al desarrollo de soluciones bastante eficientes y muy sólidas.

Por lo general, los países desarrollados en su mayoría están ubicados al norte del Ecuador condicionados a percibir niveles inferiores de radiación solar a diferencia de los países en subdesarrollo, más cercanos al Ecuador. Esto se da básicamente debido a la posición relativa de la Tierra respecto al Sol y el movimiento de la misma alrededor del astro, que condicionan, por ejemplo, que los países cercanos al Ecuador reciban más radiación solar que los que se encuentran ubicados cerca de los polos y que en verano llegue más energía solar que en invierno. Existen también excepciones importantes como es el caso de algunos países desarrollados que si gozan de una ubicación geográfica ideal para el aprovechamiento de la radiación solar como España, Italia y Portugal o el sur de USA, la India y China.



*Figura 12. Mapa de radiación de Europa, en rojo las áreas de mayor radiación solar [JRC SR].*

Los países de la península Ibérica, por su posición geográfica obtienen unos índices de radiación bastante elevados lo que les posiciona de manera privilegiada de cara al uso de la energía solar

fotovoltaica. Esto se ha ido traduciendo en una realidad importante: De acuerdo análisis de la EPIA<sup>9</sup>, durante el año 2008 se instalaron unos 5.600 MW en todo el mundo, esto supuso un crecimiento del 130% en relación a la potencia instalada en 2007 (año en que ya hubo un crecimiento del 50%), estableciendo en los primeros puestos del ranking global, a España (2.600 MW) y Alemania (1.500 MW), los cuales abarcaron los dos tercios de la potencia total instalada, acentuando con ello la tónica dominante del mercado solar durante los últimos años: alta concentración en pocos países [IAASIF].

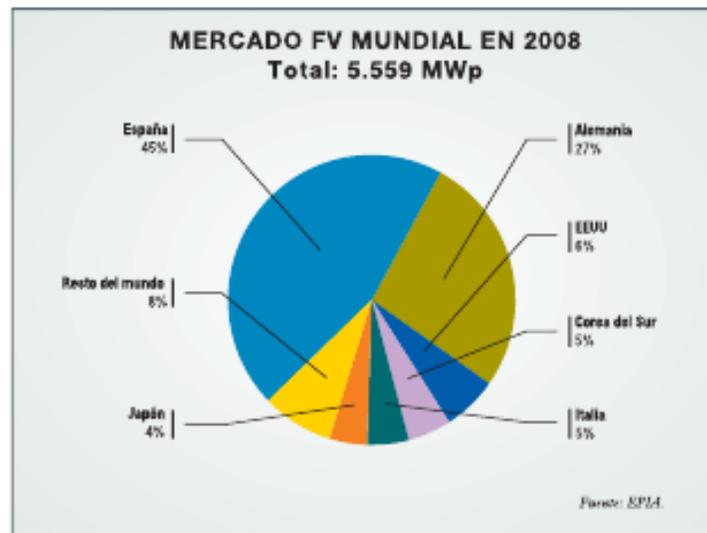


Figura 13. Mercado mundial de generación de energía solar fotovoltaica. [IAASIF].

Al hablar de las condiciones que presenta el territorio Español, debemos hacer mención especial de la región de Andalucía ya que se presta como una de las regiones ideales para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica. Cuenta además, con temperaturas elevadas pero estables durante la mayor parte del año, y con grandes extensiones de tierra que permiten la instalación masiva de módulos fotovoltaicos y sistemas de electrificación rural.

Por esto, se enmarca a esta región, como un entorno rural ideal para la aplicación, despliegue y desarrollo de soluciones energéticas a través de sistemas de electrificación autónomos rural fotovoltaicos.

<sup>9</sup> Asociación de la Industria Foto-voltaica Europea

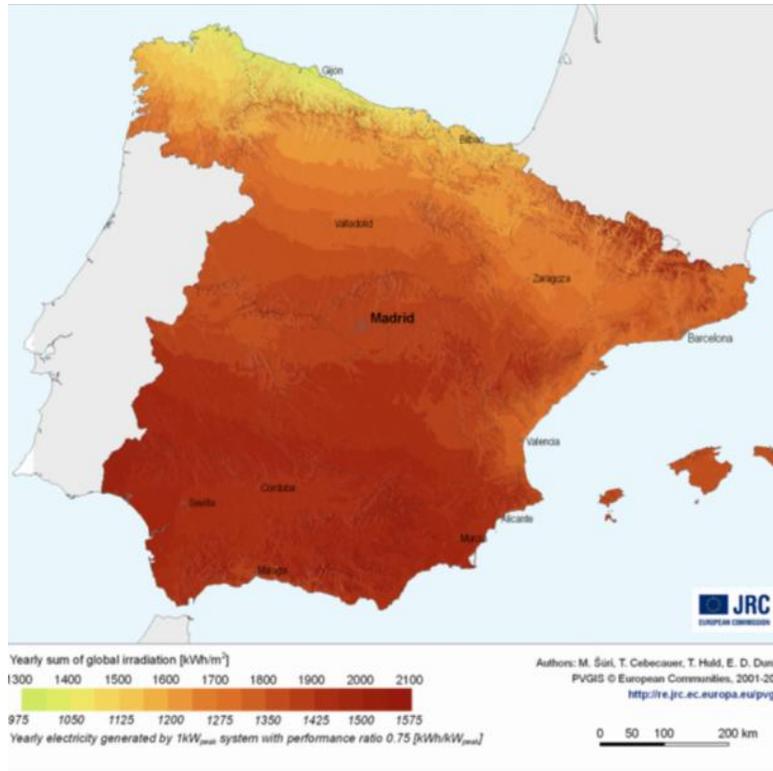


Figura 14. Irradiación solar en el territorio Español, mas rojo mayor irradiación [WEB-JRC].

- **Entornos rurales extremos.**

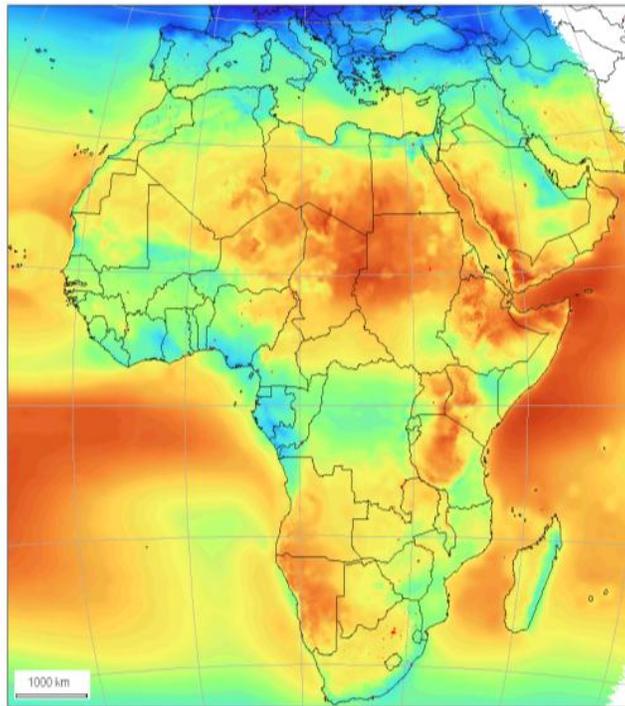
Las zonas geográficas aisladas, generalmente de países subdesarrollados, donde el acceso es bastante difícil, las condiciones geográficas y climatológicas son ampliamente variables e irregulares y donde usualmente se instalan aplicaciones de TIC4D o soluciones de energía para comunidades aisladas enmarcadas dentro de proyectos de cooperación de ONGDs y gobiernos locales, son las que dentro de este proyecto de investigación delimitaremos como entornos rurales extremos.

Este tipo de entornos, se encuentran en países donde a pesar de su privilegiada situación, encontramos pocos medios para explotar el potencial de la energía solar fotovoltaica. Esto acarrea una dependencia importante sobre las fuentes tradicionales de energía que por lo general están bastante alejadas de estas zonas.

Una situación contradictoria es el hecho de que, a pesar de que estas zonas se encuentran en una ubicación geográfica estratégica que garantizaría unos niveles de irradiación bastante elevados,

su condición de subdesarrollo no les permite contar con iniciativas importantes en esta materia que les permita beneficiarse de estas tecnologías.

Estas zonas aisladas están pobladas por pequeñas comunidades, generalmente etnias indígenas o por grupos de personas con carencias extremas de los diferentes servicios básicos. El hecho de su aislamiento dificulta aún más las tareas que se puedan realizar en ellas.



*Figura 15. Mapa de radiación África, en rojo las áreas de mayor radiación solar [WEB-RCSR].*

Para situarnos dentro de un contexto geográfico específico, propondremos ubicarnos en Perú. Territorio compuesto por diversos tipos de geografía y de una climatología única, con altos índices de irradiación solar y caracterizado por ser un país de amplia recepción de programas y ayudas para la cooperación al desarrollo.

En Perú, hay alrededor de 7 millones de habitantes sin electricidad. Casi toda esta gente vive en áreas rurales, debido a la baja densidad poblacional y las dificultades geográficas de gran parte del territorio. A pesar de esto y de los importantes esfuerzos del gobierno y organismos de cooperación internacional, existen todavía pocos sistemas fotovoltaicos instalados. Hasta 2005, en Perú se encontraban alrededor de 10.000 sistemas autónomos instalados, con una potencia total de 1,5 MWp. (1) 65 % de esta potencia corresponde a sistemas autónomos para TIC4D, 29

% para iluminación interna a casas, incluyendo postas de salud, salas comunales, etc., y el resto para otros usos de refrigeración, bombeo de agua, etc.) [PEC].

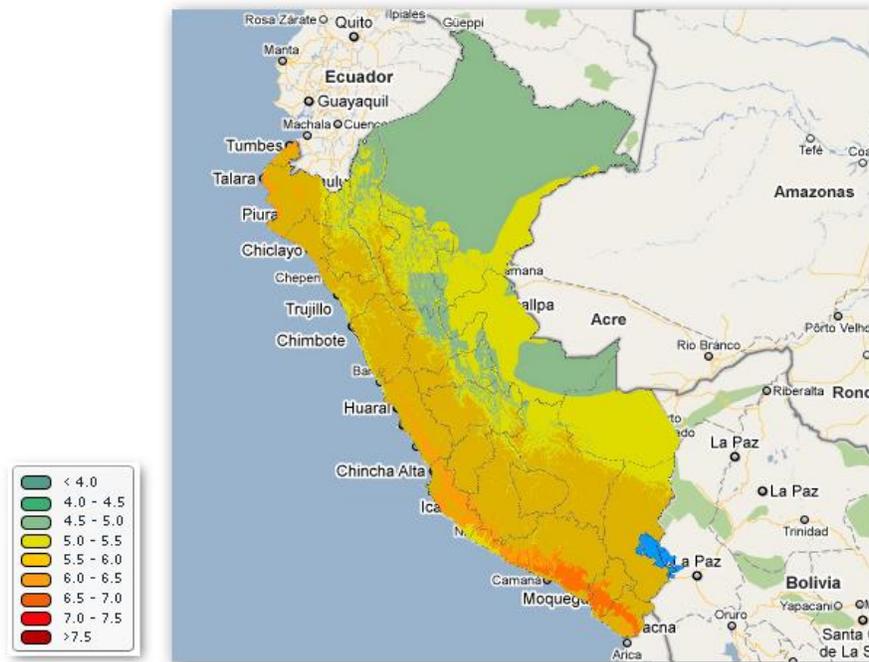


Figura 16. Mapa de radiación solar del Perú [WEB-MINEM-PE].

Existen diversos proyectos de cooperación importante en el territorio peruano, para nuestra investigación nos centramos en algunos desarrollados en la rivera del río Napo, proyectos en su mayoría implementados por organismos internacionales de cooperación como la fundación EHAS y el GTRPUCP que en coordinación con otros organismos desarrollan importantes aportaciones para las mejoras de las condiciones de los poblados establecidos en estas zonas.

En esta área geográfica, propondremos la identificación puntual como un entorno rural extremo para aplicaciones de sistemas de electrificación autónomos en TIC4D.

#### 1.1.4. Situación actual del mercado.

Para determinar el estado actual de los sistemas de electrificación autónomos rural, es preciso establecer un estudio que nos permita conocer el contexto en el que sitúan cada uno de los elementos del sistema en el mercado actual. El mundo de las energías renovables y más específicamente de la energía solar fotovoltaica representa un mercado bastante maduro, que cada vez más va produciendo dividendos e impulsando al consumidor hacia el uso de estas

tecnologías, debido a su alcance, el aura ecológica y esencialmente la independencia de la red tradicional de energía para mantenerse.

En la actualidad, países como EEUU o los miembros de la Unión Europea han establecido numerosas e importantes leyes y directivas para la promoción y el uso de las energías renovables. Logrando con esto importantes impulsos en el desarrollo, la investigación y la comercialización de estas tecnologías. Tanto ha sido el alcance de estas políticas que ya en 2008 la industria Fotovoltaica dobló la producción con respecto al año anterior logrando en producción de módulos fotovoltaicos 7.3 GWp. Esto, sumado al creciente potencial y a las continuas interrupciones de electricidad por sobrecargas de la red tradicional, así como al aumento de los precios de la electricidad procedente de las fuentes de energía convencionales, añade el atractivo perfecto a los sistemas fotovoltaicos [\[IAASIF\]](#).

- **Desarrollo histórico.**

En el ámbito de los sistemas de electrificación rural fotovoltaica, es preciso hablar de la necesidad de generar energía en zonas donde no existía o no existe acceso a esta a través de los medios convencionales. Debemos destacar el apoyo de organismos internacionales y gobiernos locales para la materialización de soluciones de este ámbito que permiten el desarrollo de las zonas rurales, pobladores y sus recursos.

El elemento más determinante dentro de los sistemas de electrificación autónomos, independientemente de su aplicación final, y quien hace que estos sistemas sean hoy una herramienta indispensable en zonas rurales sin red eléctrica convencional, es sin duda el modulo o generador solar fotovoltaico. Particularmente en España, durante los últimos años, se ha producido un salto cuantitativo muy importante en la potencia instalada anualmente, coincidiendo con el inicio en el mercado de las aplicaciones conectadas a red. Se destacan los 6 MW fabricados por Isofotón y los 5 MW fabricados por BP Solar, sin olvidar la fabricación de módulos por Artesa con células importadas [\[EIFVSaS\]](#).

- **Mercado.**

En la última década las empresas de energía fotovoltaica han alcanzado un crecimiento de producción anual por encima del 40%. Actualmente el volumen de negocio de esta industria representa cerca de diez mil millones de euros al año, refiriéndonos al mercado europeo.

Este mercado se ha caracterizado por el fuerte dominio alemán sobre otros países de la Unión Europea como España, Italia, Francia y Grecia, quienes en los últimos años han aumentado considerablemente sus cuotas de mercado. En la comunidad europea existen aproximadamente 70.0000 personas que laboran en este sector. Sin embargo aunque la productividad de la industria fotovoltaica se ha orientado cada vez más hacia el uso de cadenas de producción automatizadas y unidades y sistemas de costos reducidos, el rápido aumento del mercado ha creado la necesidad más empleos en este prominente sector [JRCSR].

Hoy en día, este crecimiento es cada vez más importante. Como ejemplo claro podemos mencionar que el mercado de generación de energía Español pasó de tener instalados 560 MW en 2007 a tener a finales de 2008 una capacidad instalada de 2,5 a 2,7 GW, casi un 390% más. Este crecimiento ha convertido a España en 2009 en el mercado más grande de generación de energía fotovoltaica del mundo seguido desde cerca por Alemania que es ahora el segundo en tamaño de mercado. Siguen en la lista fabricantes y generadores de países como USA (342MW), Corea del sur (282MW), Italia (258MW) y Japón con (230 MW) [IAASIF].

Las tecnologías fotovoltaicas, están en un continuo desarrollo bien sea orientados hacia las propiedades de sus materiales y componentes o hacia la innovación de los procesos, para todos los elementos de la cadena de procesos que implica. Como ejemplo, en el caso de los módulos, las capas activas, la encapsulación, las capas de conducción, etc. Nuevos materiales están apareciendo para reemplazar las sustancias y materiales escasos o peligrosos. Las obleas delgadas y el aumento de la producción de celdas cada vez más delgadas requieren equipamiento estandarizado, que a su vez conlleve un mayor y mejor rendimiento de estas tecnologías. La gestión y diagnóstico en línea son soluciones que se están impulsando mucho para incrementar la calidad, el control y un mejor entendimiento de las relaciones entre los parámetros de procesos y las características de los elementos y sus componentes [JRCSR].

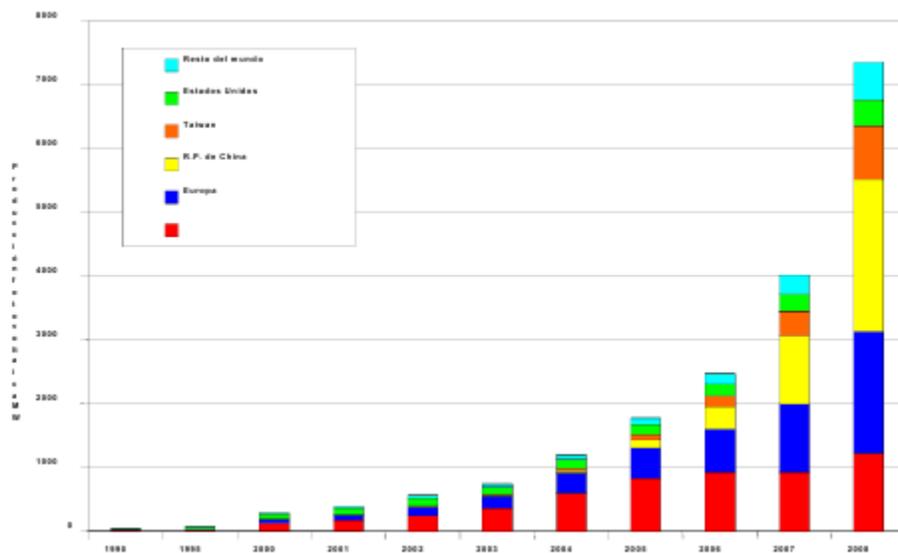


Figura 17. Producción mundial de Paneles fotovoltaicos [JRCSR].

Como se ha comentado anteriormente, en el mercado actual la competencia aumenta cada día más. Nuevas tecnologías se están desarrollando, los sistemas de electrificación fotovoltaicos son un 60% más rentables que en la década de los 90. La brecha que existe hasta ahora recae en la reducción y en el menor coste por vatio, esto permitirá tener más alcance y aumentar la competitividad de cara a las tecnologías de generación de electricidad tradicionales a medio plazo [JRCSR].

- **Tecnologías.**

Según estudios de organismos destacados en el sector como ASIF<sup>10</sup> o el JRCSR<sup>11</sup> cada poco tiempo se bate un nuevo récord de eficiencia en el área de las células fotovoltaicas y no cesan de crearse nuevas aplicaciones en los procesos productivos, más económicos y menos intensivos en materiales para alcanzar los niveles de potencia deseados.

En la actualidad, el récord de eficiencia en laboratorios está en una célula de triple unión, basada en el germanio, que ha alcanzado el 42,8% [JRCSR]. En el ámbito de las tecnologías ya en fase comercial, el rendimiento que alcanzan las células no es tan elevado, pero sigue una senda ascendente clara. Mientras se incrementa la eficiencia, la cantidad de silicio necesaria para

<sup>10</sup> Asociación de la Industria Fotovoltaica

<sup>11</sup> Joint Research Centre. PV Status Report.

producir un Wp se reduce a un ritmo del orden del 5% anual, consiguiéndose con ello importantes ahorros [IAASIF].

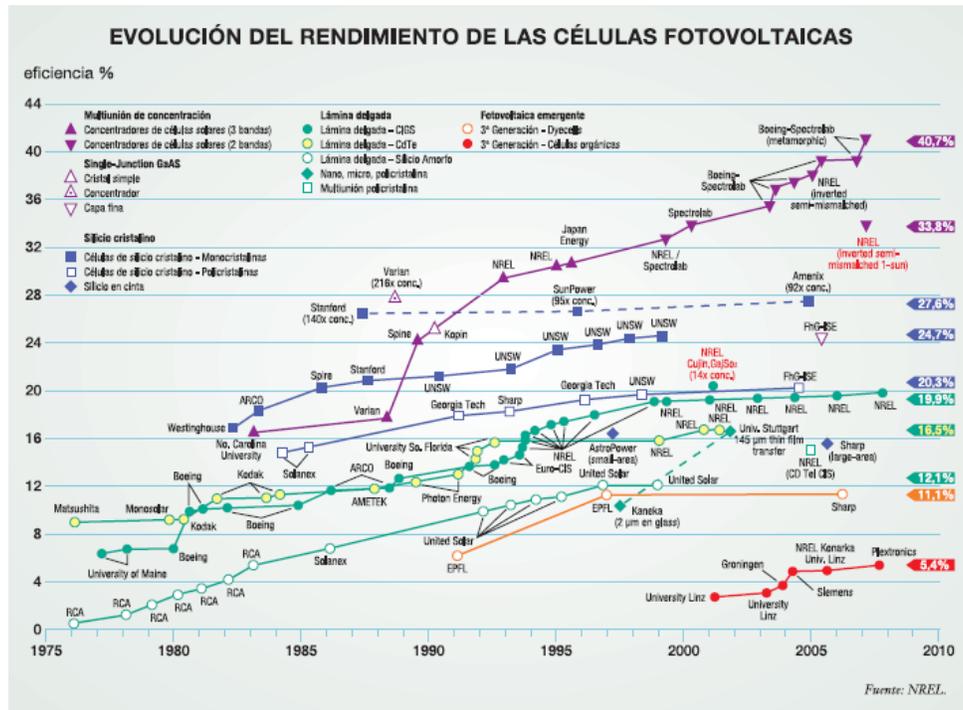


Figura 18. Evolución del rendimiento de las células fotovoltaicas [IAASIF].

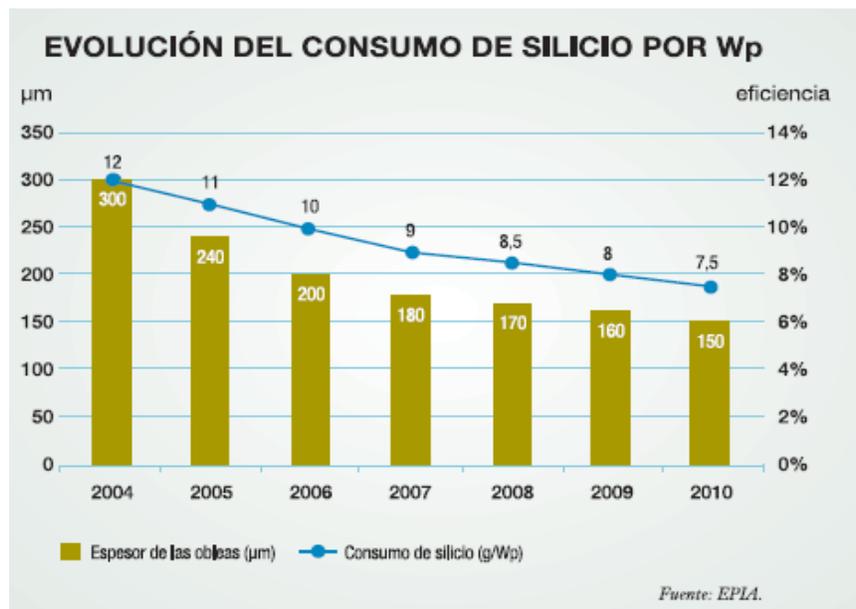


Figura 19. Evolución del consumo de Silicio por Wp [IAASIF].

Esta mejora constante, y la gran variedad existente de tipos de células o de materiales capaces de producir el efecto fotovoltaico, son fruto de la cantidad y la calidad de la innovación del sector, uno de los más activos del mundo. Un análisis de las patentes registradas en los últimos años desvela la importancia que tiene la I+D+I<sup>12</sup> como motor de desarrollo. La fotovoltaica lidera el ranking de todas las energías renovables, de por sí intensivas en investigación. Como resultado de todo ello, en los últimos años han eclosionado las llamadas tecnologías fotovoltaicas de capa fina o capa delgada, que vienen a sumarse a la oferta comercial de los tradicionales sistemas basados en silicio mono o poli-cristalino. Cada una de ellas tiene unas características propias y bien diferenciadas.

Es preciso comentar que en cuanto al reparto del mercado encontramos que las tecnologías fotovoltaicas de capa delgada siguen ganando relevancia y cuota global, a pesar de que las tecnologías clásicas de poli-silicio dominan el mercado con claridad. Otras tecnologías novedosas, como la fotovoltaica de concentración, tienen una presencia aún muy marginal a pesar de sus tremendas posibilidades.

	Tecnologías cristalinas estándar	Silicio amorfo		CdTe	CIGS
		a-SI	a-SI/μ-SI		
<b>Eficiencia de los módulos</b>	13% - 19%	5,5% - 6,5%	9% - 11%	10% - 11%	8% - 11%
<b>Precios de los módulos (€/Wp)</b>	2,2 - 2,6	1,8 - 2	1,9 - 2,1	1,5 - 2	1,9 - 2
<b>Cuota de mercado actual</b>	90,0%	3,9%		2,7%	0,2%
<b>Principales ventajas</b>	Tecnología madura	Tecnología con experiencia		Eficiencia relativamente alta	Fácil implementación en sustratos flexibles
	Cadena de suministro establecida	similar a procesos probados de producción de dispositivos TFT & LCD		Bajos costes de producción	
	Alta eficiencia				

<sup>12</sup> Investigación más desarrollo más innovación

<b>Principales inconvenientes</b>	Alta dependencia de los precios de las materias primas	Baja eficiencia	Menos expectativas de mejora de eficiencia a largo plazo	Potencial toxicidad del Cd	Altos coeficientes de pérdidas por temperatura
				Déficit de potencial del telururo	Déficit de potencial y elevado coste del indio
		Experiencia limitada	Experiencia limitada	Experiencia limitada	

*Tabla II. Características de las distintas tecnologías fotovoltaicas [IAASIF].*

- **Futuro.**

Tanto la capacidad de producción que ha alcanzado la industria solar, como el subsiguiente descenso de costes y el contexto energético mundial, indican que la paridad de la red se puede alcanzar en los próximos años en amplias regiones del mundo, naciendo con ello un mercado gigantesco y una nueva dimensión de la fotovoltaica. Previendo esta situación, la EPIA<sup>13</sup> ha incrementado su objetivo de cobertura de la demanda eléctrica europea con energía fotovoltaica en 2020 desde el 3% hasta el muy relevante 12%. Un análisis de dos posibles escenarios sobre la evolución del mercado global en los próximos años puede ser el siguiente:

El primero, el escenario moderado, plantea un desarrollo sin mecanismos de apoyo público relevantes. El segundo, el de políticas de apoyo, sí contempla la aplicación de estos mecanismos. Hay una importante diferencia entre un escenario y otro a corto plazo. Mientras en el Moderado el mercado decrece en 2009 por efecto de la crisis global y el frenazo del mercado español, en el de Políticas de Apoyo, el crecimiento aunque se ralentiza, tiene una evolución al alza más constante y pronunciada.

---

<sup>13</sup> European Photovoltaic Industry Association



Figura 20. Evolución prevista del mercado [IAASIF].

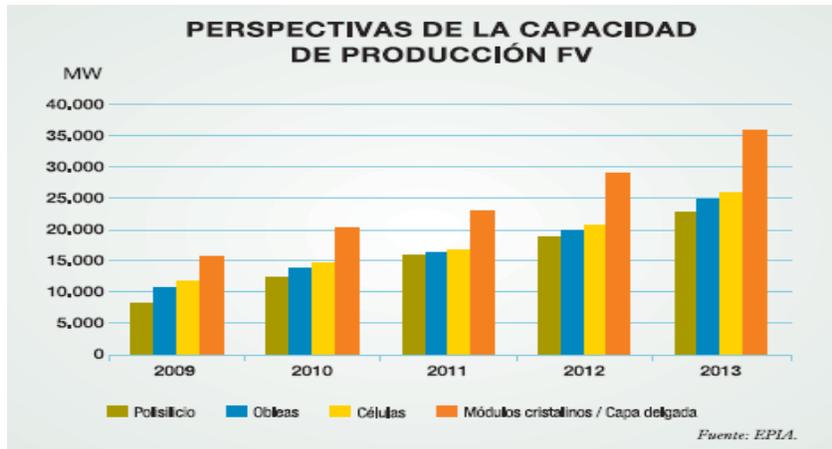


Figura 21. Perspectivas de capacidad de producción [IAASIF].

Finalmente, en cuanto a las opciones de futuro para las distintas tecnologías, se espera que el crecimiento del segmento de capa fina alentado por la disponibilidad de proveedores de factorías “llave en mano” capaces de integrar toda la cadena de producción, sea superior al de las tecnologías cristalinas clásicas, a las que irá ganando cuota de mercado progresivamente.

## 1.2. Planteamiento del problema.

### 1.2.1. Problemáticas generales del sistema.

En este apartado se describen diferentes problemáticas o modos de fallos que inciden sobre el funcionamiento general del sistema, a través de este análisis podremos comprender las problemáticas más comunes de cada elemento del sistema de electrificación autónoma. Así mismo, se estudiarán los diferentes mecanismos de fallo y sus efectos sobre otros elementos del

sistema con el objetivo de poder responder a las distintas situaciones que se presenten planteando soluciones que permitan optimizar su funcionamiento.

A continuación mencionaremos los elementos del sistema autónomo y describiremos sus problemáticas más comunes.

#### ***1.2.1.1. Problemáticas del Módulo fotovoltaico.***

La observación y estudio de los sistemas fotovoltaicos nos ha permitido entender que las deficiencias en el suministro eléctrico están provocadas generalmente por complicaciones no relacionadas con el generador. La propia construcción de los módulos o paneles solares fotovoltaicos y la ausencia de elementos mecánicos móviles (exceptuando la existencia de terminales para la interconexión a la red), junto con la existencia y aplicación práctica de diversas normativas internacionales es lo que garantiza la gran fiabilidad presente en la mayoría de estos elementos [TDPD].

Aún sabiendo que estos elementos poseen una alta eficiencia, se pueden encontrar ciertas fallas que, aun siendo poco usuales, limitan el correcto funcionamiento del sistema.

Algunas de las problemáticas más comunes que presenta este elemento son:

- **Potencia real inicial de módulos inferior a la nominal.**
- **Pérdida de potencia progresiva por degradación.**
- **Generación inferior a la de diseño por sombreado.**
- **Rotura, fallo súbito (especialmente por fallo de cortocircuito del diodo de paso).**

A través de la investigación bibliográfica realizada sobre estos elementos hemos podido constatar y agrupar las deficiencias de este elemento a través de un diagrama de fallos, que nos permita entender mejor cómo y porqué ocurren estos.

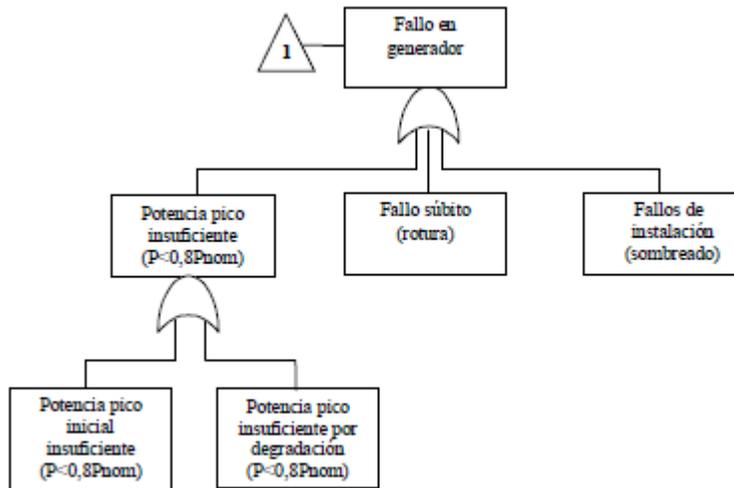


Figura 22. Diagrama de fallos<sup>14</sup> de el modulo fotovoltaico, [TDPD]



Figura 23. Casos de fallos en la fase de sombreado e instalación defectuosa [TDPD].

### 1.2.1.2. Problemáticas de la batería.

La batería es considerada como uno de los elementos más problemáticos dentro de los sistemas de electrificación autónomos, debido generalmente a los distintos tipos de averías que puede presentar durante su vida de operación. Estas averías se deben más a mala operación de estos elementos que a la propia tecnología o composición de la batería.

Estas situaciones de fallo dificultan seriamente el dimensionado e instalación de baterías, ya que es necesario lograr que aporten el mínimo grado de estandarización imprescindible para lograr unos costes razonables y una disponibilidad amplia [TDPD].

<sup>14</sup> Este es un diagrama lógico que muestra las interrelaciones entre un fallo crítico general, definido previamente.

Además de los fallos por mala regulación de las cargas, las causas más comunes de fallo del banco de baterías suelen tener su origen en:

- **Capacidad inicial baja.**
- **Pérdida de capacidad por degradación progresiva.**
- **Fallo súbito (agua no repuesta, rotura caja, cortocircuito entre terminales, cortocircuito interno por precipitación de material, etc.).**

A modo de entender mejor el proceso o fases de fallos presentes en este elemento, hemos analizado al igual que en el caso de los módulos un diagrama de fallos en baterías, como se muestra en la figura 24.

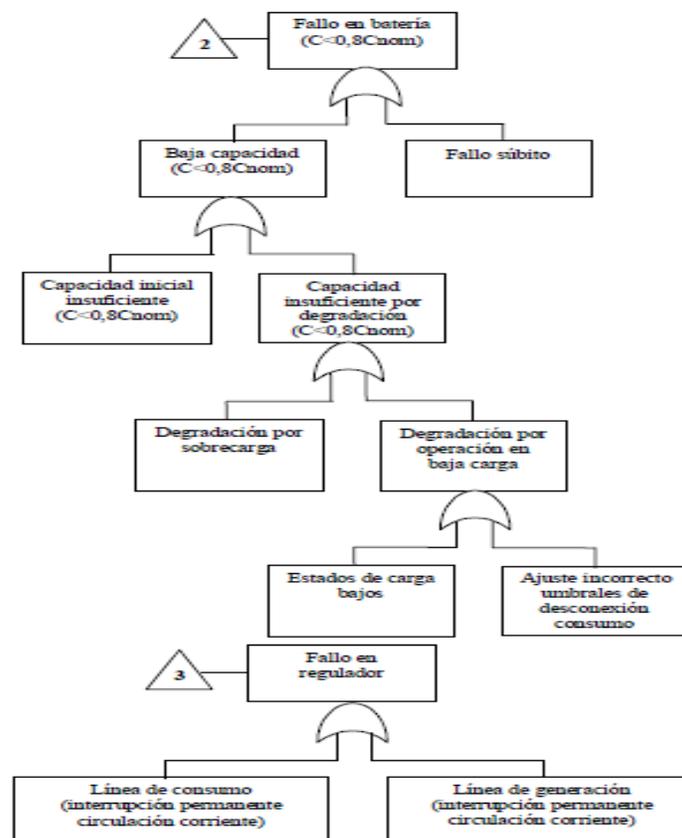


Figura 24. Diagrama de fallos de la batería [TDPD].



*Figura 25. Fallos comunes en mantenimiento e instalación de baterías.*

### **1.2.1.3. Problemáticas del regulador.**

El regulador de carga supone un coste de inversión inicial bajo, entre el 5-10% del total de la instalación [TDPD], pero su impacto sobre el suministro eléctrico final y sobre el coste de operación del sistema fotovoltaico es sumamente importante y elevado. Básicamente por su influencia sobre la batería. Se encarga de normalizar los niveles de energía que vienen tanto del generador como de la batería hacia la carga. Tiene así mismo, otra función, que es la de actuar de conmutador en la carga de las baterías desde el modulo cuando el nivel de estas es bajo.

Algunas de las problemáticas más comunes son:

- **Autoconsumo y caídas de tensión excesivas.**
- **Regulación incorrecta de batería por mal ajuste en diseño inicial o por desajuste en operación.**
- **Ausencia de funciones de protección (no existencia, rotura, puenteo, etc.).**



*Figura 26. Puenteo al regulador en instalación en Bolivia [TDPD].*

#### **1.2.1.4. Problemáticas del inversor.**

El inversor es un dispositivo muy útil dentro de los sistemas de electrificación autónomos, ya que permite a los usuarios utilizar cargas convencionales de corriente alterna que son fáciles de encontrar en el mercado de la red eléctrica [TDSL]. A pesar de sus conocidas ventajas, estos elementos pueden acarrear algunas problemáticas sobre la operatividad del sistema autónomo. Las cargas AC<sup>15</sup> están diseñadas para operar en las condiciones particulares de la red eléctrica convencional (buena regulación del voltaje y frecuencia, baja distorsión armónica, capacidad de entrega de elevadas corrientes, entre otras.), las cuáles pueden no ser mantenidas por los inversores convencionales.

Esto indudablemente puede representar un riesgo importante sobre las cargas, o incluso ocasionar serias averías en el sistema, por lo que deben tomarse en cuenta estos dispositivos al detalle, en el momento del dimensionado, instalación y gestión.

Estos elementos pueden generar tensiones alternas (125 ó 220V) que representan un peligro potencial para los usuarios finales. Es cierto también que la conversión DC/AC<sup>16</sup> causa pérdidas de energía en el sistema, por lo que tienen que compensarse “extrayendo vatios” desde el generador fotovoltaico [TDSL].

---

<sup>15</sup> Corriente alterna

<sup>16</sup> Corriente continua/corriente alterna

Entre las problemáticas más comunes, podemos destacar.

- **Fallos en los niveles de potencia nominal y de arranque.**
- **Regulación irregular de tensión y frecuencia.**
- **Distorsiones armónica.**
- **Umbral de desconexión.**
- **Rizado.**



*Figura 27. Utilidades del inversor.*

#### **1.2.1.5. Problemáticas del cableado y accesorios.**

Sabemos que, la transmisión de corriente entre los elementos de generación, almacenamiento y regulación, hasta la salida hacia el consumo, debe realizarse de forma efectiva y segura, empleando el cableado adecuado para la potencia de trabajo y las condiciones ambientales previstas. El uso de protectores eléctricos, tomas de corriente, y terminales de conexión adaptados a estándares nacionales e internacionales son necesarios para garantizar la operatividad del sistema a un nivel óptimo.

Entre las causas o problemáticas más comunes tenemos.

- **Caídas de tensión excesivas.**
- **Cortocircuito.**

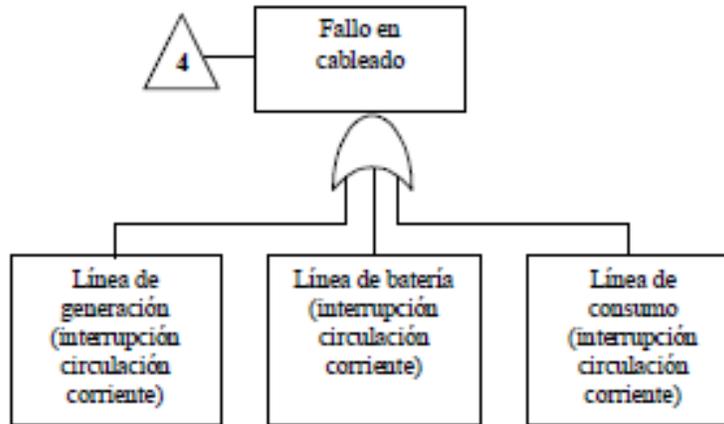


Figura 28. Diagrama de fallos del cableado [TDPD].

### 1.2.2. Problemáticas específicas de las aplicaciones del sistema.

En este apartado se describirán las distintas problemáticas que presentan los entes que utilizan los sistemas de electrificación autónomos en sus soluciones de telecomunicaciones. Para ello se contactó con organismos no gubernamentales y con la empresa privada para obtener la información que permita tomar una visión más crítica sobre el desempeño de estos sistemas en aplicaciones reales y así plantear soluciones específicas que se adapten a sus necesidades.

#### 1.2.2.1. Problemáticas de aplicaciones del sector privado.

Tanto en el aspecto económico, como en el aspecto tecnológico los sistemas de electrificación autónomos usados por la industria privada se diferencian de los utilizados por las ONGDs o de entes gubernamentales. De las diversas empresas consultadas en la investigación, haremos referencia a la empresa Ingenova Consulting SLU. Esta es una empresa de consultoría especialista en proyectos TIC, cuyo entorno de acción es principalmente la región de Andalucía en España. La información aportada por los especialistas de la empresa nos ha permitido recabar datos relacionados con un proyecto específico, donde se utilizan sistemas de electrificación autónomos para alimentar sus sistemas de telecomunicaciones.

El proyecto Guadalteba consiste en el despliegue una solución de telemática para el desarrollo rural en la comarca de Guadalteba-Andalucía. Este proyecto se adapta convenientemente a nuestra investigación ya que reúne aspectos fundamentales para nuestro estudio como son los sistemas autónomos y su uso como fuente de energía a sistemas de telecomunicaciones rurales.

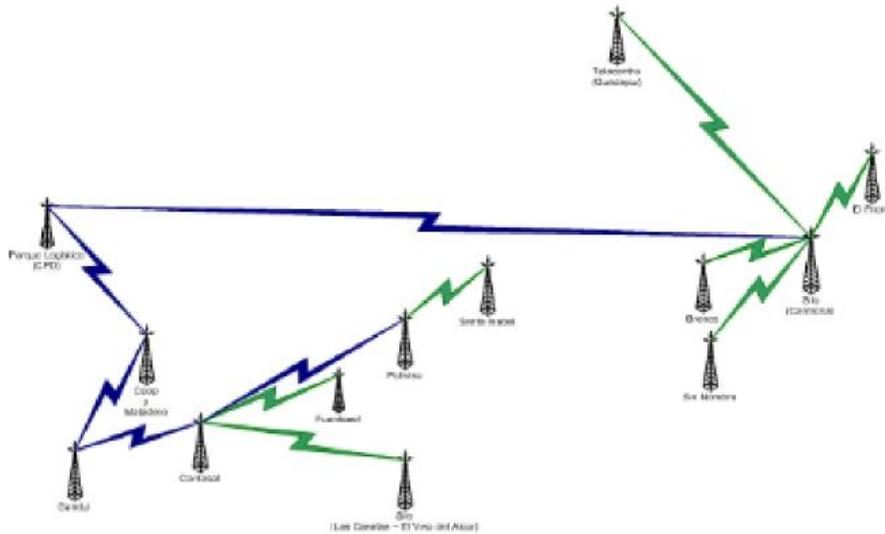


Figura 29. Esquema de red de un proyecto desplegado por Ingenova Consulting SLU.

El proyecto desarrollado por Ingenova posee 6 años de antigüedad y su objetivo es el ofrecer acceso a telefonía rural y conexión a internet en estas zonas rurales.

A través de las herramientas de recolección de datos hemos podido obtener información valiosa sobre las problemáticas que manifiestan en la empresa, siendo una de las más destacadas la necesidad de mejorar el rendimiento de sus sistemas de electrificación autónomos a través de una herramienta que garantice la gestión de los mismos sin comprometer los niveles de calidad que ofrecen actualmente.

Del conjunto de problemáticas planteadas por esta empresa podemos destacar las siguientes:

- **Registro histórico de fallos nulo.**

No poseen algún registro histórico sobre los fallos en sus sistemas, lo que les dificulta conocer mejor el funcionamiento de estos y predecir futuros fallos.

- **Deficiencias en la gestión de los sistemas.**

No pueden gestionar sus sistemas de electrificación autónomos, debido a que no poseen un personal técnico especializado, que pueda movilizarse constantemente hacia las instalaciones.

- **Elevado número de fallos.**

Presentan un incremento en el número de fallos de sus sistemas autónomos se ha incrementado considerablemente con respecto al tiempo.

Estos datos han sido extraídos a través de las encuestas y entrevistas realizadas al personal técnico de Ingenova Consulting, serán utilizadas como fuente de información para nuestro análisis, ya que describe de cierta forma algunas de las problemáticas que presentan los sistemas de electrificación autónomos para soluciones de telecomunicaciones rurales en aplicaciones usadas por la empresa privada [ESAF], [TDPD], [EEIC].

### 1.2.2.2. Problemáticas de aplicaciones en ONGDs.

Para la consecución de este apartado hemos accedido a variada información bibliográfica, así como también, a información suministrada a través de nuestras herramientas de recolección de datos por personal especializado en el mantenimiento e implantación los distintos sistemas de electrificación rurales de ONGDs como pueden ser EHAS y el Grupo de Telecomunicaciones Rurales de la Pontificia Universidad Católica del Perú [APRWC], [ELC-EHAS].

Estas organizaciones han efectuado despliegues de soluciones TIC4D en zonas rurales de diversos países en vías de desarrollo. Entre las distintas redes que tienen desplegadas en zonas rurales del territorio peruano podemos mencionar el proyecto “Willay Cuzco”.

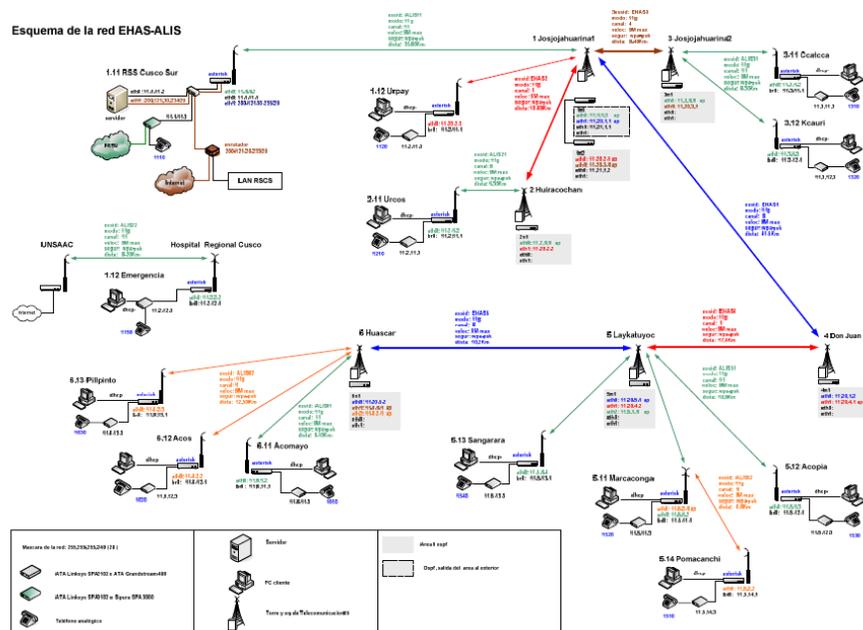


Figura 30. Esquema de la red EHAS-ALIS y Willay Cuzco [APRWC].

Para este es el proyecto, hemos tenido acceso a información referente a este proyecto, de la cual podemos extraer diversas problemáticas, que detallamos a continuación.

- **Problemáticas importantes de logística.**

Para la compra, transporte y la instalación de sistemas de electrificación autónomos. Por lo general, no poseen representantes locales de sus marcas. Esto hace que la mayoría de los elementos del sistema sean de carácter de importación lo que incide directamente en los costes, garantías, tiempos de instalación, reparación y mantenimiento de los sistemas [APRWC], [ELC-EHAS].

- **Dificultades para transporte de equipos.**

Los módulos presentan dificultades para su transporte e instalación de reemplazos o nuevos componentes del sistema, debido al peso rigidez y las distancias hasta los lugares de instalación [ELC-EHAS].

- **Fallos constantes en baterías.**

Las baterías presentan fallos constantes, sobre todo las que necesitan ser constantemente rellenadas con agua destilada y por diversas razones esta labor no se realiza siempre a tiempo [ELC-EHAS].

- **Operación deficiente de los reguladores.**

El tipo de regulador que utilizan generalmente opera de forma deficiente cuando ocurre una descarga atmosférica, ya que se que interrumpe su operación hasta que se efectué su reinicio manual causando con esto la paralización total del sistema autónomo [ELC-EHAS].

- **Incremento en los fallos de inversores.**

Se han experimentado muchos fallos en los inversores, debido a reinicio constantes ante el aumento de las cargas y para ciertos componentes de la solución de telecomunicación rural. [ELC-EHAS].

- **Deficiencias en el mantenimiento.**

No cuentan con los activos necesarios para la ejecución ideal de un plan de mantenimiento, debido a la falta de personal calificado, sitios muy dispersos geográficamente y poco presupuesto [ELC-EHAS].

- **Falta de proveedores locales.**

Pocos proveedores locales para cubrir cualquier requerimiento [ELC-EHAS].

- **Necesidad de mejora.**

Tienen la necesidad de establecer algún mecanismo que les permita gestionar estos sistemas, pero aun no han contado con una propuesta seria que les permita evaluar la factibilidad de un desarrollo de este tipo, han manifestado la factibilidad de colaborar con un proyecto de investigación para el desarrollo de una solución de este tipo [ELC-EHAS].

- **Deficiencias en el registro y seguimiento de fallos.**

Poseen un sistema de notificación y seguimiento de fallos que está des-actualizado y es rudimentario para su relleno. [ELC-EHAS].

### **1.3. Objetivos.**

Identificación de las necesidades actuales que las ONGDs y otros organismos presentan en sus soluciones de telecomunicaciones rurales. Se propone la realización de un proyecto que permita mejorar el rendimiento de los sistemas de electrificación autónomos rural actuales que se utilizan como fuentes de suministro de energía para proyectos de telecomunicaciones rurales.

Ayudar a estos organismos que utilizan las TIC4D a optimizar el rendimiento de sus sistemas de electrificación rural, nos permitirá ofrecer una variedad de alternativas de mejora para que quienes utilizan estos sistemas dentro de sus infraestructuras y redes de telecomunicaciones puedan replantear sus procesos y soluciones. Tras estas reflexiones y apoyándonos en diverso y extenso material bibliográfico existente, se ha procedido a plantear los objetivos específicos y generales que permitirán conseguir esta investigación.

### **1.3.1. Objetivo General.**

Optimizar el funcionamiento de los sistemas de electrificación autónomos para aplicaciones de telecomunicaciones rurales.

### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

A través del estudio realizado se pretende:

- Profundizar en el estudio de los problemas técnicos de los sistemas fotovoltaicos autónomos, particularizando en el subsistema de acumulación de energía y su regulación.
- Establecer una herramienta de gestión y análisis de la confiabilidad para instalaciones fotovoltaicas autónomas que unifique la influencia de la fiabilidad asociada a averías, los problemas derivados de su mantenimiento y la pérdida de carga asociada al dimensionado del sistema.
- Valorar la influencia de aspectos concretos de los sistemas fotovoltaicos y de sus componentes sobre el comportamiento global, mediante la aplicación del análisis a escenarios particulares.

Más allá del mero cumplimiento de los objetivos formales de este proyecto de investigación y de la intención de enriquecer los conocimientos actuales, este trabajo está fuertemente motivado por la realización de una tesis doctoral que logre ahondar más en los conocimientos adquiridos y desarrollar una herramienta de gestión y monitorización que permita a los administradores del sistema gestionar y mejorar el rendimiento de sus sistemas autónomos.

### **1.4. Límites y alcances.**

La presente propuesta de investigación debe limitarse a un trabajo piloto, principalmente por la dificultad de extraer más datos representativos y de campo sobre las situaciones actuales de los sistemas de electrificación autónomos en entornos rurales. También porque resulta difícil la inclusión dentro de esta investigación de todos los organismos que utilizan estos sistemas para aplicaciones de telecomunicación rural. Para ello se eligió a dos fuentes de información que representen de alguna manera las condiciones actuales que presentan tanto los organismos no gubernamentales (Fundación EHAS), como, parte de la empresa privada (Ingenova Consulting

SLU). Con los datos aportados por estas dos fuentes y lo obtenido de la extensa investigación bibliográfica podremos, conocer mejor los sistemas de electrificación autónomos y sus problemáticas actuales.

#### **1.4.1. Límites.**

Para poder conocer el impacto que representan los sistemas de electrificación autónomos y sus aplicaciones en las telecomunicaciones rurales, en el presente proyecto, se tomarán como caso de estudio proyectos desplegados por la fundación EHAS en la amazonía Peruana: Red Alis-Willay Cuzco. Y el proyecto de despliegue de una red de telecomunicaciones rurales por parte de una empresa privada en la comarca de Guadalteba-Andalucía (España). Ambas redes son alimentadas a través de sistemas de electrificación autónomos, siendo a su vez, proyectos que ofrecen servicios de TIC4D (telefonía e Internet rural, canales de radio para comunicaciones entre centros de salud...) entre otras funcionalidades específicas.

#### **1.4.2. Alcances.**

Se realizará un marco conceptual sobre el sistema autónomo y sus principales aplicaciones.

Se evaluarán las distintas problemáticas planteadas por los organismos y bibliografía consultada y a través del estudio de los datos obtenidos, se plantearán diversas recomendaciones que permitan la optimización de los sistemas.

Se proporcionarán conclusiones y sugerencias para los actuales y futuros proyectos que pueda permitir su optimización, teniendo como eje central el sistema de electrificación autónomo.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **2.1. Materiales.**

Fue preciso realizar una técnica de recolección de datos que basada en la observación documental y bibliográfica. Babavaresco [MET-BA] señala que esta técnica se apoya en distintos tipos de notas de contenido como pueden ser la información general, resúmenes, paráfrasis, entre otros. De los cuales se han tomado en cuenta diversos textos especializados en la materia, proyectos fin de carrera, tesis doctorales, revistas y publicaciones científicas así como también la obtención de información a través de portales web especializados en el área de telecomunicaciones y fotovoltaica. También, fueron utilizadas como fuente de información entrevistas no estructuradas a profesionales del área, así como encuestas de este mismo ámbito.

### **2.2. Métodos.**

Para la realización de este trabajo de investigación, se utilizó una combinación de las metodologías de Pressman [MET-PRESS] y de Bates [MET-BATES]. De estas metodologías, se tomaron como base para esta investigación cuatro fases, las cuales han sido adaptadas al presente trabajo con la finalidad de responder los objetivos y requerimientos planteados, para establecer una coherencia organizada y contribuir con la estructura del estudio, a tal efecto se exponen los mismos.

- **Marco teórico.**

En este apartado de la investigación se indagó el estado del arte y la situación actual en todo lo referente a los sistemas de electrificación autónomos, situación actual del mercado fotovoltaico y los tipos de soluciones de telecomunicaciones que utilizan comúnmente estos sistemas.

- **Planteamiento del problema.**

En este segundo apartado se propuso la recopilación de información a través de distintos métodos y herramientas, que nos permitieron conocer a fondo las problemáticas de los sistemas de electrificación autónomos utilizados en soluciones de telecomunicaciones rurales.

- **Formulación de resultados.**

El estudio detallado de las problemáticas existentes y su posterior análisis nos llevará a plantear las soluciones que pueden tomarse en cuenta para dar respuesta a estas problemáticas y con esto conseguir la optimización de estos sistemas.

- **Evaluación y puesta en marcha.**

En este último apartado, se implantarán estas soluciones. Debido a los límites y al alcance de este proyecto, se ha propuesto la continuación de esta fase en el desarrollo a través de un trabajo de investigación, tesis doctoral, con extensa experimentación de “campo” más acorde a las condiciones reales necesarias para la elaboración de esta fase.

En cuanto al tipo de investigación, debemos mencionar que según Chávez [MET-CHA] se considera que un estudio es del tipo aplicado cuando se traduce en hechos que aporten alternativas y que permitan resolver un problema particular dentro de un periodo determinado de tiempo. Basándonos en este concepto, podemos determinar que esta investigación es efectivamente del tipo aplicada, ya que busca la optimización de los sistemas de electrificación autónomos a través de la realización de una o varias de soluciones propuestas dentro de un periodo de tiempo determinado.

Refiriéndonos a lo planteado por Babaresco Pág. 26 [MET-BA], una investigación es descriptiva si, se busca a través de esta describir y analizar sistemáticamente las características homogéneas de los fenómenos estudiados. Tomando en cuenta los señalamientos anteriores y luego de la realización de esta investigación, se ha realizado una descripción de la información recabada referente al tema objeto de este estudio, logrando así obtener respuestas a las problemáticas e incógnitas planteadas. Por esto se establece que la investigación también es una investigación descriptiva, porque en ella se realiza un análisis de la información recolectada en referencia al tema de estudio.

### **3. RESULTADOS.**

A través de esta investigación hemos podido constatar la realidad que viven los diferentes organismos que trabajan con sistemas de electrificación autónomos para alimentar sus aplicaciones de telecomunicaciones.

Por una parte se encuentra la empresa privada, que a través de un modelo de negocio hace uso de estos sistemas para poder tener cobertura en zonas rurales donde potenciales clientes necesitan sus servicios y gracias a esto poder obtener un beneficio económico. Esto las impulsa a mantener unos niveles de operatividad eficientes que cumplan con los requerimientos de estos clientes.

En el otro extremo tenemos a las ONGDs, las cuales necesitan de los sistemas de electrificación autónomos para poder dotar de energía sus proyectos de TIC4D rurales, que buscan ofrecer a sus usuarios finales aplicaciones para desarrollar sus condiciones de vida actuales.

A pesar de estos dos enfoques distintos, ambos organismos comparten la misma necesidad de mantener unos niveles de rendimiento y confiabilidad óptimos.

Con esta investigación pretendemos conocer las necesidades y plantear soluciones que permitan esas mejoras deseadas por estos organismos. A continuación describiremos las propuestas y conclusiones de nuestra investigación.

#### **3.1. Propuestas generales para la optimización.**

Basándonos en los estudios de los componentes de los sistemas de electrificación autónomos y apoyados en los análisis realizados sobre estos, hemos elaborado una serie de propuestas orientadas a optimizar el rendimiento y confiabilidad de los elementos que conforman el sistema de electrificación autónomo.

##### **3.1.1. Caracterización de elementos y Análisis de fallos.**

Como primera recomendación destacamos la necesidad de la caracterización previa de cada elemento del sistema autónomo. Con esto se pretende recalcar la importancia de estudiar con detenimiento los elementos a utilizar, donde podamos comparar tecnologías, fabricantes, rendimientos y fiabilidades de cada uno, tomando en cuenta la diversidad de fabricantes y

modelos existentes en el mercado. Este paso previo permite conocer más en detalle el comportamiento del sistema, sus limitaciones, características de operación mínimas y máximas.

Como se pudo observar en apartados anteriores, específicamente en los diagramas de fallos realizados, hemos pretendido demostrar la importancia de esta caracterización. En los diagramas se han utilizado compuertas OR para conectar las cadenas de fallos de los distintos elementos, es decir, los tipos característicos de fallos de los elementos están conectados en serie, lo que permite visualizar que un único fallo en cualquiera de los puntos indicados causa el fallo general del sistema [TDPD].

Esta situación de aparente falta de fiabilidad es algo que existe comúnmente en la mayor parte de las instalaciones de generación eléctrica y en especial en sistemas aislados, donde únicamente en aspectos relacionados con la seguridad se incluyen elementos redundantes. Con esta propuesta se pretende precisamente, avanzar en la mejora de la confiabilidad de estos sistemas, asumiendo esas limitaciones. Y en caso de necesitar obligatoriamente una mayor garantía de funcionamiento, si se dispone de los recursos, seleccionar componentes de elevada calidad técnica, adquirir repuestos suficientes, o bien, incluir un sistema generador de apoyo (eólico, diesel, entre otros).

### **3.1.2. Ubicación estratégica del sistema.**

Según los datos suministrados por EHAS, existen evidencias que señalan la instalación de elementos del sistema autónomo en torres de telecomunicaciones, generalmente previstas para la instalación de antenas y de algunos dispositivos de telecomunicaciones.

Sería deseable evitar la instalación de los elementos del sistema en las torres de telecomunicaciones<sup>17</sup>, ya que además de representar un peligro tanto para la estructura de la torre, como para las personas y edificaciones cercanas, representa también, un aumento de costes en el mantenimiento.

Esta situación tiene como fundamento que:

---

<sup>17</sup>Existen evidencias que demuestran la salvedad de que en algunos casos los módulos fotovoltaicos si ameritan esta acción debido a la amplia vegetación y los riesgos de de vandalismo puedan comprometer su utilización y aprovechamiento.

- La potencia entregada en la batería, sumada a las pérdidas por la longitud del cable hasta el equipo de telecomunicaciones son muy altas. Ello imposibilita el funcionamiento del sistema de telecomunicaciones y obliga a conectar el sistema de electrificación lo más cerca posible al equipo de telecomunicaciones para garantizar la correcta operación de este último.

Para evitar estas situaciones sería necesario un “redimensionado” del sistema lo que en dependiendo de la ocasión valdría la pena evaluar su factibilidad técnico-económica.

- La otra razón argumentada es la poca seguridad que poseen estos sistemas al estar instalados en tierra, ya que existe el riesgo de que por sabotaje o vandalismo sean dañados o robados.

Ante esta argumentación, la propuesta es la “inmersión” de la población local en estos proyectos. El fomento de las responsabilidades compartidas entre usuario y administrador permite crear un nexo que responsabiliza al usuario en el mantenimiento de la seguridad de los equipos y sistemas instalados en su localidad.

A partir de esto, es necesaria la construcción de una caseta ventilada y con las condiciones deseables para instalar en ella el sistema de electrificación de manera que no se siga comprometiendo la seguridad de la torre y de las edificaciones cercanas a esta.

### **3.1.3. Módulos.**

La indisponibilidad de datos reales y acordes con las realidades de las zonas de estudio sobre el comportamiento de los módulos fotovoltaicos en operación es, aunque escasa, claramente mayor a la del resto de elementos del sistema. Del estudio bibliográfico realizado se proponen cuatro parámetros que pueden resultar de mucha utilidad para el estudio del comportamiento a largo plazo de los módulos fotovoltaicos, estos son: tasa de fallo/MTBF, potencia inicial, pérdida de potencia por degradación y tasa de rotura.

- **Tasa de fallos/MTBF:**

Estos parámetros se obtienen mediante cálculos realizados a partir del estudio de un número extenso de instalaciones en EEUU, después de años de operación.

Estos sistemas son, por lo general, sistemas conectados a la red eléctrica, si bien a efectos de la operación de los módulos los datos pueden considerarse extrapolables a otro tipo de aplicaciones. En la tabla siguiente se muestran datos que, como se observa, no incluyen información sobre la evolución temporal de la aparición de fallos, sino únicamente valores medios. En las mismas referencias se asume una tasa de fallos constante con el tiempo, que aquí se mantiene a falta de más información. Se observan las grandes diferencias, debidas a las propias diferencias en tipo de módulo y condiciones de instalación [TDPD].

<b>Ref. Bibliográfica</b>	<b>Origen datos</b>	<b>Nº fallos/año</b>	<b>MTBF (años)</b>
EEUU <sup>39</sup> , 1994	Datos reales	1 cada 552 módulos	552
EEUU <sup>86</sup> , 1994	Datos reales	1,5 cada 10.000 módulos	6.666
EEUU <sup>41</sup> , 1988	Datos reales	2 cada 10.000 módulos	5.000

*Tabla III. Datos sobre fallas en módulos fotovoltaicos*

Como hemos indicado anteriormente, debe prestarse atención al significado real de cada parámetro y, en concreto, a los datos de MTBF que aparecen en la literatura. En elementos con tasa de fallo constante, los valores de MTBF, en años, sólo son aprovechables precisamente en la fase útil de dichos elementos, antes de su fin de vida, así pues, en su relación con el número de elementos fallados sobre un grupo grande [TDPD].

- **Potencia inicial:**

Existen referencias a ensayos realizados sobre módulos fotovoltaicos de diferente tecnología en los que se compara la potencia real con los valores nominales suministrados por los fabricantes.

Referencia bibliográfica	Tipo de módulo	$P_0 - P_{nom} / P_{nom}$ (%)
LEEE-TISO <sup>91</sup> , 1998	c-Si	-14 a 0
LEEE-TISO <sup>91</sup> , 1998	a-Si	+4 a +15
LEEE-TISO <sup>90</sup> , 2000	c-Si	-15 a -6
LEEE-TISO <sup>164</sup> , 2001	c-Si	-15 a 0
BRASIL <sup>89</sup> , 1998	c-Si	-2 a -7
	c-Si	-10 a -20
	c-Si	-5 a -8
EEUU <sup>165</sup> , 2000	c-Si	-5
	c-Si	-14
	c-Si	-6

*Tabla IV. Datos sobre potencia inicial en módulos fotovoltaicos*

Como se puede observar en la tabla IV, existe una gran dispersión, con una tendencia diferente según la tecnología.

- **Pérdida de potencia por degradación:**

En la tabla V se resumen los datos hallados sobre pérdidas de potencia por degradación experimentada por los módulos fotovoltaicos en condiciones reales de operación, tanto eléctricas como meteorológicas. Se asume como válida una tendencia linealmente decreciente en potencia durante toda la vida de los módulos [TDPD].

Referencia bibliográfica	Tipo de módulo	$-\Delta P$ (%)/año
Sandia National Laboratories <sup>77</sup> , 1993	c-Si	1-2
Spectrolab <sup>83</sup> , 2000	c-Si	0,5
LEEE-TISO <sup>84</sup> , 2001	c-Si	<1 (dispersión)
Australia <sup>85</sup> , 1996	c-Si	0,5-1
Australia <sup>85</sup> , 1996	a-Si	2-3
NREL <sup>92</sup> , 1997	a-Si	15-20 (inicio) 1 (posteriormente)

*Tabla V. Datos sobre las pérdidas de potencia por degradación en módulos fotovoltaicos.*

Es importante destacar los ensayos realizados por el laboratorio suizo LEEE-TISO por más de 18 años a más de 250 módulos iguales, en condiciones de operación similares. Aquí se muestra una

dispersión apreciable con respecto a la pérdida de potencia. Un 6% de los módulos ha sufrido pérdidas superiores al 20%, un 35% de ellos entre el 10 y el 20% y el 59% restante menos del 10%.

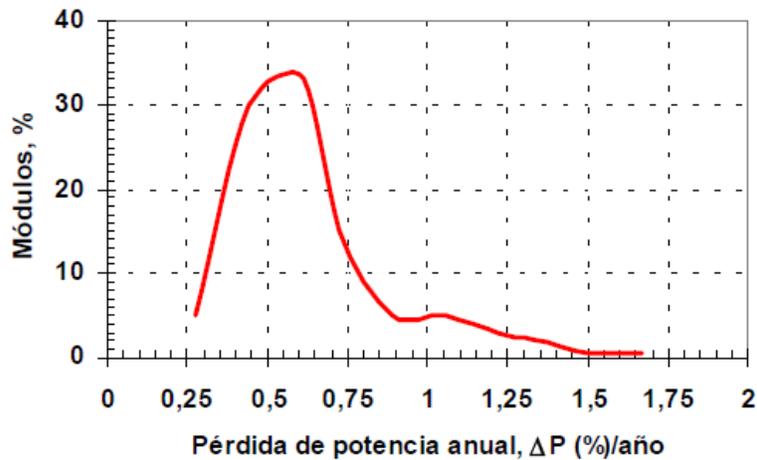


Figura 31. Distribución de pérdida de potencia anual en módulos, después de 18 años de operación [TDPD].

- **Rotura:**

En la Tabla VI se muestra la información recopilada con respecto a las referencias cuantitativas que tiene que ver con la rotura de módulos en diversos entornos.

Ref. Bibliográfica	Tipo	Años en operación	% módulos rotos/año
LEEE-TISO <sup>167</sup> , 2000	c-Si	18	0,15
EEUU <sup>78</sup> , 1996	c-Si	10	0,4
	c-Si	14	0,2
Indonesia <sup>71</sup> , 1999	c-Si	9	0
Sector privado, Kenya <sup>74</sup> , 2002	a-Si	2	10

Tabla VI. Datos sobre la rotura de módulos en operación [TDPD].

Las conclusiones extraídas de las tablas y figuras anteriores, indican que, por lo general los tipos de fallos en los módulos ofrecen valores bastante bajos que, aunque son importantes considerar en el momento del dimensionado, compra etc. para el análisis como parte de un programa de optimización del sistema, pueden despreciarse. Con acceder a la extensa documentación existente

en esta área se pueden encontrar datos suficientes que aporten resultados importantes al estudio, sin la necesidad realizar sistemas o pruebas complejas que puedan afectar el desarrollo del proyecto de optimización.

También, es preciso destacar que a través de la información recolectada, se pudo comprobar el seguimiento de las tendencias actuales del mercado en cuanto al tipo de módulos usados para estas aplicaciones. Podemos mencionar que entidades como Ingenova o la fundación EHAS utilizan módulos de silicio poli-cristalino, (EHAS: Modulo Isofotón, IS-160) (Ingenova: modulo Photowatt 70w), que se adaptan eficientemente al entorno donde trabajan.

A través de un análisis comparativo sobre las marcas y modelos de módulos solares fotovoltaicos de silicio poli-cristalino más comercializados y representativos del mercado actual pudimos obtener una visión bastante clara sobre los 8 principales fabricantes del mercado. Los valores de eficiencia, Vatios por metros cuadrados y superficie requerida para generar 100 Kw de potencia nos han permitido evaluar cuales son los más importantes y qué pueden ofrecer, para obtener un criterio más claro sobre la elección de módulos fotovoltaicos.

Marca/Modelos	Rendimiento (%)	Vatios por metros cuadrados (Watt/m2)	Superficie necesaria para 100Kw (m2)
Yingli YL230	14,1	141	708
Sharp NU235	14,3	143	700
Yocasol PCA210	14,3	143	695
Suntech STP280	14,4	143	693
Canadian CSI230	14,3	144	695
Brisban BS190S5	15	150	668
SunPower 300	18,4	180	543

*Tabla VII. Comparativa de módulos más usados actualmente [WEB-RPM].*

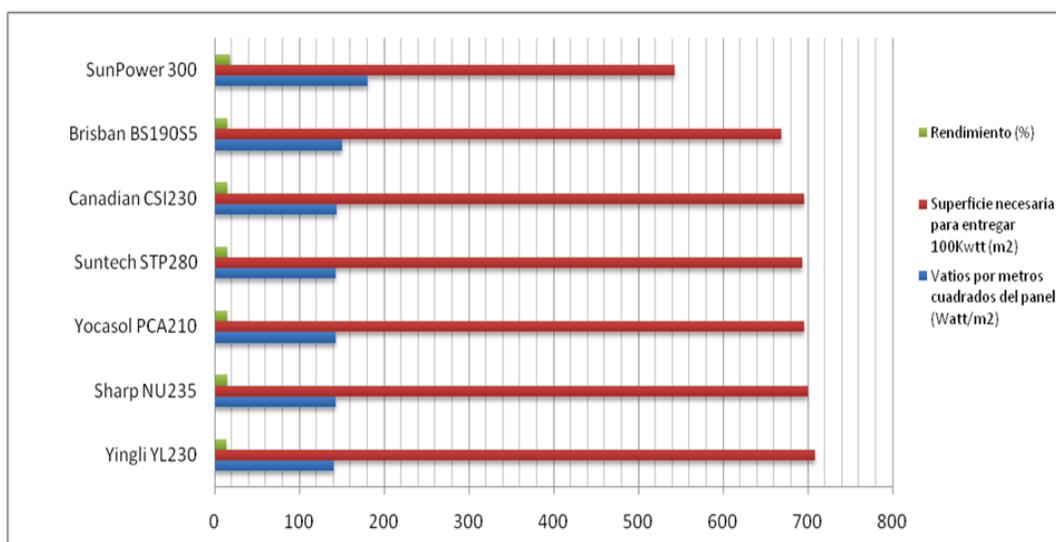


Figura 32. Grafica comparativa de módulos poli-cristalinos.

Esto demuestra que los fabricantes de esta tecnología ofrecen niveles de garantías de servicios y precios altamente competitivos. Tanto que el 93 % de todos los módulos fotovoltaicos vendidos en el mundo son de silicio cristalino (mono y poli-cristalinos), el 6 % de silicio amorfo y sólo el 1 % del resto de tecnología de lámina delgada [RCFR].

Podemos inferir por tanto, que a gracias a esta demanda y competencia existente en el mercado poli-cristalino, no existe una diferencia altamente apreciable entre los tipos de módulos analizados, por lo que no es determinante la elección de una marca específica.

Otro punto que vale la pena considerar, es el uso de paneles de silicio amorfo a-Si. Hemos accedido a datos representativos que tras ser analizados, nos permiten reflexionar sobre esta tecnología de módulos. En la tabla VIII explicamos ciertas diferencias entre los módulos más comercializados en la actualidad y los de silicio amorfo.

	Espesor	Eficiencia	Color	Características
Silicio mono-cristalino	0,3 mm	16 - 18 %	azul oscuro, negro con recubrimiento de AR, gris sin recubrimiento de AR	Mayor producción. Mejor investigado material de la célula solar - la más alta relación potencia / área.
Silicio poli-cristalino	0,3 mm	14 - 16 %	Azul con recubrimiento AR, plata y gris sin recubrimiento	La mayor producción importante al menos para los próximos diez años.

Silicio amorfo	0,0001 mm + 1 a 3 mm de sustrato	8- 12 %	Rojo-azul, negro.	Baja eficiencia, flexibles, producción estándar
----------------	----------------------------------	---------	-------------------	---

*Tabla VIII. Comparación entre tecnologías de módulos fotovoltaicos [IAASIF].*

Del contenido de la tabla anterior, podemos inferir lo siguiente:

- A pesar de que el modulo construido con silicio poli-cristalino ofrece un nivel superior de rendimiento al modulo de silicio amorfo 16% frente a un 10%, para estas aplicaciones (telecomunicaciones rurales) no contamos por lo general con las limitaciones del espacio como en el caso de las instalaciones fotovoltaicas residenciales.
- La calidad de ambos es bastante sólida, sin embargo es sabido que este tipo de módulos construidos con silicio amorfo, tiene una durabilidad más extensa, además de que los niveles de garantía por lo general son más elevados que los de poli-cristalino.
- El coste del módulo en un sistema autónomo representa, conjuntamente con la batería, la inversión más alta del sistema (en torno a un 40-55% del coste total). Los módulos de silicio amorfo son hasta un 25% más económicos que los de silicio poli-cristalino, lo que se traduce en un ahorro significativo de costes en la instalación.
- Por ser de silicio amorfo, estos módulos son altamente flexibles y livianos en comparación con los de poli-cristalino, esto se ve reflejado directamente en el momento del transporte de los mismos. Con este tipo de módulos se reduce considerablemente los riesgos de accidentes durante el transporte, así como también el tiempo de instalación y despliegue de sistemas.

El peso, coste y flexibilidad de estos paneles, es un factor diferenciador con respecto a los construidos con silicio poli-cristalino. Aunque su rendimiento es inferior, un buen dimensionado permitirá la instalación de módulos de silicio amorfo en una zona rural determinada.

De lo expuesto anteriormente se puede concluir también, qué aun siendo los más utilizados, los paneles de silicio poli-cristalino. No debe descartarse la utilización de forma singular de paneles de silicio amorfo, especialmente en aquellas localizaciones donde predomine la radiación difusa respecto a la directa por tener este material un valor de absorción mucho mayor, así como

también, en localizaciones donde su acceso sea muy complicado y dificulte el transporte de paneles rígidos como los de silicio poli-cristalino.

#### **3.1.4. Baterías.**

Existe una posición muy amplia y tradicional por parte de la industria fotovoltaica, sobre las deficiencias en la operación de las baterías en instalaciones fotovoltaicas autónomas. Es sabido que, este es un elemento muy delicado y por lo general, el más costoso a largo plazo.

Como se ha comentado anteriormente existe poca información sobre evolución, fallos y fiabilidad de las baterías en sistemas de electrificación autónomos en operación, y por lo general se refiere a un número pequeño de unidades. Además, existe la dificultad de identificar el fin de vida de batería, más allá del fallo completo: se establece aquí un límite mínimo admisible de capacidad del 80% de la capacidad nominal para determinar la necesidad de recambio de una batería, si bien, en la práctica, la batería en ocasiones se utiliza hasta que ya no suministra nada de energía. Sin embargo, en estas condiciones, el servicio eléctrico no se realiza correctamente (número de horas de uso previstas) y, por tanto, se puede considerar como un caso de funcionamiento incorrecto.

A partir de la revisión bibliográfica efectuada, la información disponible sobre funcionamiento real de baterías se puede agrupar en tres categorías: tiempo en operación, capacidad inicial y pérdida de capacidad por degradación. Se observa cómo, a diferencia de los módulos, no existe en este caso información específica sobre tasas de fallos ni otros parámetros[TDPD].

- **Tiempo en operación:**

En la tabla IX, se muestra el tiempo medio de operación de las baterías en sistemas de electrificación autónomos aislados. Según los datos, este tiempo medio se sitúa entre 2 y 4 años. También es importante destacar que existen casos de operación más prolongada que, sin embargo, ocultan una pérdida de capacidad significativa aunque no se haya producido el recambio [TDPD].

Referencia bibliográfica	Tipo de batería	Tiempo en operación
Sukatani <sup>71</sup>	Solar modificada	4 años
	SLI arranque	3 años 6 meses
Fraunhofer-ISE <sup>102</sup>	SLI arranque	2-3 años
PRONASOL <sup>100</sup>	SLI arranque	2 años 6 meses
Bolivia <sup>105</sup>	SLI arranque	6-9 años
Brasil <sup>101</sup>	SLI arranque	2 años 5 meses

Tabla IX. Datos sobre tiempo de operación de las baterías [TDPD].

Los datos aportados muestran una tasa de fallos de la batería del 20%; en 91 sistemas analizados y después de 15-20 meses de operación [TDPD].

- **Capacidad inicial real:**

Según datos aportados por la revisión bibliográfica realizada, los distintos ensayos existentes sobre baterías muestran una situación en general positiva.

Fuente de datos	Tipos de baterías	Co-Cnom/Cnom(%)
TDPD	VRLA	101
	Solar modificada	99
	Solar modificada	98
	Solar modificada	97
	Solar modificada	96
	Solar modificada	96
	SLI de arranque	96
	SLI de arranque	96
	Solar modificada	94
	Tubular	91
	SLI de arranque	90
	Tubular	89
	Solar modificada	89
	Solar modificada	88
	SLI de arranque	87
	Solar modificada	84
	SLI de arranque	64
SLI de arranque	55	
Fraunhofer-ISE	SLI de arranque	95
	SLI de arranque	88
	SLI de arranque	80

	SLI de arranque	80
	SLI de arranque	80
	SLI de arranque	70

*Tabla X. Datos de capacidades iniciales de baterías [TDPD].*

Como se muestra en la tabla X, no existe indicativo de un real cumplimiento de los valores suministrados por los fabricantes de estos elementos.

De esta manera se debe tomar en cuenta este aspecto al realizar el dimensionado. También, se recomienda realizar medidas previas a la instalación para comprobar que los valores ofrecidos por el dimensionado estén acordes con las medidas reales de las baterías adquiridas.

- **Pérdida de capacidad por degradación:**

Con respecto a este apartado, escasas veces se realizan medidas sobre las capacidades de las baterías tras ser retiradas. El estado real de la batería en el momento del recambio es enormemente variable y dependiente. En la Tabla XI a continuación, se muestran los datos encontrados que incluyen, además del tiempo de operación, la capacidad que aún mantenía la batería.

Ref. bibliográfica	Tiempo en operación	%C <sub>nom</sub> en retirada
Bolivia-IES <sup>105</sup>	6-9 años	50
	6-9 años	47
	6-9 años	18
	6-9 años	16
	6-9 años	3
Sukatani <sup>71</sup>	3 años 6 meses	68

*Tabla XI. Capacidades de baterías luego de operación prolongada [TDPD].*

A partir de estos datos, podemos hacer una estimación referencial de la degradación anual de las baterías, asumiendo una pérdida de capacidad lineal con el tiempo, lo cual no se aleja en exceso de la realidad. Asimismo, se supone un tiempo en operación de 8 años para las baterías de la primera referencia. En la Figura 33, podemos observar la evolución temporal de la capacidad y, con ella, el tiempo de vida real de cada una de las baterías en función del límite de capacidad al que se realice el recambio.

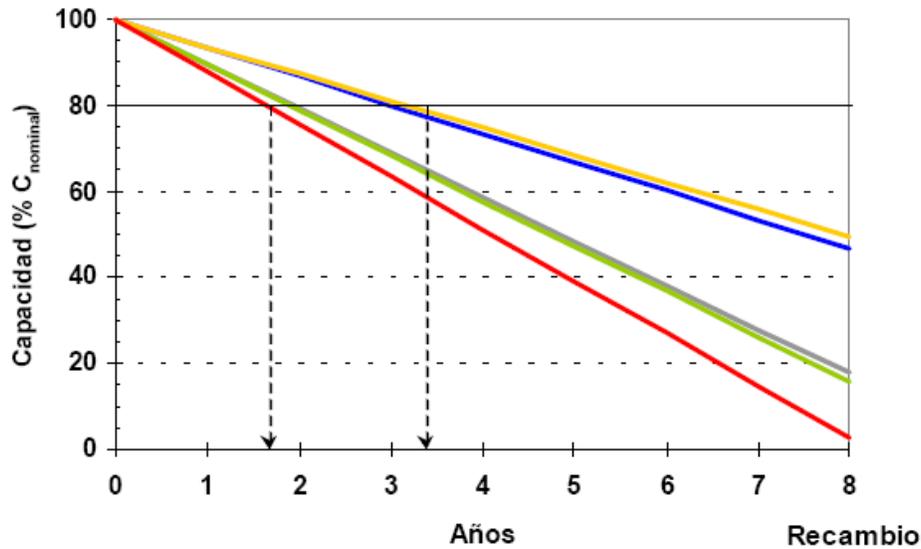


Figura 33. Evolución temporal de pérdidas de baterías en operación [TDPD].

En la práctica el momento de la retirada de la batería depende de diversos factores, entre los que se destaca: coste y disponibilidad de la nueva batería, recursos de los usuarios y nivel de consumo o de utilización del sistema y su importancia respecto a otras necesidades.

Uno de los factores que influye de forma más determinante en el ritmo de degradación de batería es la regulación asociada a dicha batería. Una regulación deficiente, permite descargas excesivas de batería.

Junto a esto, la influencia concreta sobre el tiempo de vida de las baterías presenta muchas incertidumbres. Por estos motivos, en análisis posteriores se estudia el efecto de un ajuste incorrecto únicamente para la comparación entre sistemas [TDPD].

Es por esto, que es necesario tomar en cuenta las diversas normativas y procedimientos que existen actualmente para el dimensionado, instalación y mantenimiento de estos elementos, destacando de entre ellas la norma técnica universal para sistemas fotovoltaicos domésticos, creada por el instituto de energía solar en España en 1998 [NTUSFV].

Tipo de batería	CR <sup>18</sup>	
	Obligatorio	Recomendado
Tubular	20	15
SLI Clásica	40	30
SLI Modificada	40	35
SLI Bajo-Mantenimiento	40	30

*Tabla XII. Relación entre capacidades de baterías[NTUSFV].*

Tipo de batería	PDMax (%)	
	Obligatorio	Recomendado
Tubular	80	70
SLI Clásica	50	30
SLI Modificada	60	40
SLI Bajo-Mantenimiento	30	20

*Tabla XIII. Parámetros de PDMax (%)<sup>19</sup> en baterías [NTUSFV].*

Tipo de batería	NOC
Tubular	600
SLI Clásica	200
SLI Modificada	200
SLI Bajo-Mantenimiento	300

*Tabla XIV. Representación de la vida de algunas baterías según el NOC<sup>20</sup> [NTUSFV].*

La inclusión de baterías de tecnologías alternativas a las actuales, puede aportar fiabilidad al sistema con respecto a su entorno de operación. Esto indudablemente debe ir ligado estrechamente a factores como costes y presupuesto del proyecto, masa crítica de instalaciones y la viabilidad de estas frente a factores límites como temperaturas extremas y ubicación geográfica del sistema.

---

<sup>18</sup> Relación entre la capacidad nominal de la batería, CB, y la corriente de cortocircuito del generador

<sup>19</sup> Máxima profundidad de descarga

<sup>20</sup> Numero de ciclos (number of cycles)

Las baterías de níquel cadmio Ni-Cd, se presentan como muy recomendables en entornos donde las temperaturas externas representan una amenaza al funcionamiento de las baterías actuales. En la tabla XV se muestra una comparativa entre las distintas tecnologías presentes en el mercado.

Tipo	Energía/ peso	Tensión por elemento (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga	Auto-descarga por mes (% del total)
	(Wh/Kg)				
Plomo	30-50	2 V	1000	8-16h	5%
Ni-Cd	48-80	1,25 V	500	10-14h	30%
Ni-Mh	60-120	1,25 V	1000	2h-4h	20%
Li-ion	110-160	3,16 V	4000	2h-4h	25%
Li-Po	100-130	3,7 V	5000	1h-1,5h	10%

*Tabla XV. Cuadro comparativo de baterías [WEB-KWP].*

De acuerdo con los datos expuestos en la tabla anterior, existen alternativas interesantes en el mercado actual de baterías que pueden reemplazar a las actualmente utilizadas en estos entornos. En la tabla XVI se muestran más detalles de la comparación entre la batería NiCd y la batería de plomo ácido, por ser estas las más destacadas.

Características	Plomo Acido	Ni Cd
Tensión nominal por celda	2 V	2V
Números de celdas para 12,24,48,110 Voltios	6, 12, 24, 55,	10, 19, 38, 92
Energía específica (Wh/kg)	25	21
Energía específica (Ah/kg)	13	19
Densidad de energía (Wh/L)	65	36
Vida útil (años)	5-10 años	> 15 años
Ciclos de Carga/descarga	150-300	600-1000
Comportamiento en descarga (altas corrientes)	Buena	Excelente
Desempeño a bajas temperaturas	Bueno	Excelente
Caída de tensión en descarga	Moderada	Muy baja, curva plana
Eficiencia de recarga	Excelente	Buena
Reposición de agua destilada	No requiere	Una vez por año
Otros mantenimientos	Recurrentes	Cambiar electrolito a 10 años
Emanación de gases peligrosos	No	Hidrogeno
Requisitos de ventilación	No	Requiere
Seguridad	Excelente	Moderada
Costes	Bajo	Alto (de 3 a 6 veces la de Pb Acido)
Reciclado	Buena	Bajo
Características	Plomo Acido	Ni Cd

Peso	Importante (2000 kg/m <sup>2</sup> )	Moderado
Volumen que ocupan	Bajo	Importante
Montaje	Cualquier posición	depende del electrolito
Coste de Inversión (€/kwh - capacidad)	160-200	690-1590
Coste específico de energía (€/kwh)	0,11-0,33	0,20-1,06

*Tabla XVI. Comparativa entre baterías de plomo ácido sellado y de Ni-Cd [WEB-VHZ].*

A partir de las consideraciones de la tabla anterior, se refuerza aun más la propuesta de búsqueda de nuevas tecnologías que permitan alcanzar mejoras representativas en entornos donde factores como la temperatura representan una desventaja en las baterías convencionales.

La vida útil de cada batería es un factor diferenciador importante entre las dos tecnologías de baterías fotovoltaicas [WEB-VHZ]. Las baterías de NiCd ofrecen más tiempo de vida útil que las de Pb ácido, así como ciclos de carga/descarga, donde estas baterías son muy superiores a las de Pb ácido [WEB-VHZ].

Por otra parte, aunque las baterías de Pb ácido son mucho más económicas que las de NiCd, no se debe descartar estas últimas debido a sus prestaciones en entornos donde las temperaturas son extremas. [WEB-VHZ].

### **3.1.5. Reguladores.**

La revisión bibliográfica realizada ha permitido encontrar causas de fallo diversas, de aparición aleatoria más que debidas a una degradación progresiva, que sólo se muestran cerca del fin de vida estimado de los equipos (ente 5 y 10 años). Si bien no constituye un problema técnico del propio equipo como tal, debe incluirse como fallos del regulador los casos de puenteo por conexión directa entre batería y consumo. A efectos prácticos, son casos en los que la función del regulador no se ejerce y el daño sobre el sistema (a través de la batería) puede ser severo.

En la Tabla siguiente se muestran los datos disponibles sobre fiabilidad de los reguladores de carga sobre el terreno [TDPD].

Ref. bibliográfica	N° de equipos evaluados	Años de operación del sistema	% reguladores con fallo	Incidencia
Indonesia <sup>71</sup>	62	9	18 23	Sustitución Punteo
Perú <sup>120</sup>	192	Dato no especificado	43	Fallos técnicos diversos
Argentina <sup>169</sup>	13	3,5	8	Sustitución

*Tabla XVII. Datos de fallos en reguladores de carga en operación [TDPD].*

De los datos referenciados en la tabla XVII que incluyen los años de operación, se obtuvo una tasa de fallo, constante, del 2% anual. Un punto importante a tomar en cuenta para el momento de elegir un regulador y establecer sus tiempos de mantenimiento. Junto a esta información sobre reguladores en operación real, cabe destacar un estudio de fiabilidad realizado por Mishra [ESTMISH] a partir de bases de datos de tasas de fallo de los componentes electrónicos internos del regulador [BDREG]. En la Tabla XVIII se muestran los datos propuestos en cuatro condiciones: regulador básico, modelo mejorado en regulación y protecciones, regulador diseñado con componentes de elevada fiabilidad y, por último, diseñado con componentes sobredimensionados.

La selección de componentes sobredimensionados en corriente es una práctica habitual de los fabricantes de reguladores de carga para reducir las tasas de fallo de sus equipos[TDPD].

Descripción regulador	Tasa de fallo (% fallos/año)
Básico	14
Mejoras funcionales en regulación y protecciones del sistema	17
Diseño con componentes de elevada fiabilidad	6
Diseño con componentes sobredimensionados (Corriente y tensión nominal doble de las condiciones de trabajo)	1

*Tabla XVIII. Estimaciones de fallo en varios diseños de regulador [TDPD].*

También es importante destacar que, existen diferencias importantes entre normativas nacionales e internacionales desarrolladas en relación con los umbrales de desconexión del consumo en los reguladores, en unas se especifican valores fijos de regulación; en otras, por el contrario, se admite un margen excesivamente amplio.

Normativa	Año	Umbrales	
		Desconexión consumo (voltios)	Re conexión consumo (voltios)
IIE México	1992	11,45 - 11,9	13,2 -13,6
Energy alternatives ÁFRICA, Kenia	2000	11,9 – 12	12,7
Especificaciones técnica, Bolivia	1996	11,0 - 11,5	12,2 - 12,8
Banco mundial - BPP, Indonesia	1996	Adaptado a la batería	Adaptado a la batería
GTZ Alemania	1995	11,4	12,6
ESKOM, Sudáfrica	1997	11,7	12,9
Banco mundial GEF – China	1999	10,8 - 11,4	No especificado

*Tabla XIX. Algunas normativas sobre la regulación del consumo en reguladores [TDPD].*

De la tabla anterior, se destaca la importancia de que el elemento elegido para el sistema cumpla con las normativas y estándares establecidos, lo que eleva la fiabilidad y el rendimiento de este elemento y a su vez el incremento de la fiabilidad del sistema de electrificación autónomo.

De esta manera podemos concluir que el regulador es un elemento esencial en la vida de la batería y por ello debe de elegirse de manera muy cuidadosa, de acuerdo a estándares y normativas, ya que los parámetros de operación de este determinaran el incremento o disminución de la vida útil de la batería y por ende del sistema de electrificación.

### **3.1.6. Inversores.**

A través de la investigación bibliográfica hemos encontrado que la estandarización de sistemas y componentes fotovoltaicos por parte de comités internacionales es un proceso aún incompleto. Únicamente en el caso de los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino puede considerarse terminado, no sólo en el sentido de la existencia de normativas, sino por su aceptación general y su aplicación real en programas de electrificación rural.

En la tabla XX se muestran los estándares principales para componentes y sistemas fotovoltaicos. Se observa cómo las especificaciones de reguladores de carga, luminarias y equipos de acondicionamiento de potencia no han concluido y, en el caso de los inversores, todavía no existen trabajos publicados que permitan clasificar según estándares internacionales los modelos actuales [TDPD].

Componente	Estándar	Título	Situación
Módulo	IEC 61215	<i>Crystalline silicon terrestrial PV modules- Design qualification and type approval</i>	Publicado 10/92
Batería solar	IEC 61427	<i>Secondary cells and batteries for solar photovoltaic energy systems- General requirements and methods of test</i>	Publicado 11/99
Regulador de carga	Borrador EN	<i>Test procedures for charge regulators in solar home systems</i>	Borrador, todavía no publicado
Inversor DC/AC	IEC 62109	<i>Electrical safety of static inverters and charge controllers for use in photovoltaic power systems</i>	Borrador ANW 12/98
	IEC 61683	<i>Photovoltaic systems-Power conditioners- Procedure for measuring efficiency</i>	Publicado 11/99
Luminarias DC	IEC 60924	<i>DC-supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps- General and safety requirements</i>	Publicado 07/90
	IEC 60925	<i>DC-supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps- Performance requirements</i>	Publicado 06/89
Sistema	IEC 62124	<i>Photovoltaic stand-alone systems- Design qualification and type approval</i>	Borrador 12/01
	IEC 62078	<i>Certification and accreditation program for photovoltaic components and systems- Guidelines for a total quality system</i>	Borrador 03/00

*Tabla XX. Publicaciones hechas y en desarrollo para sistemas de electrificación autónomos [TDPD].*

Siguiendo con lo expuesto en la tabla XX, es necesario acceder a otras fuentes para analizar en detalle el funcionamiento de estos y a través de esto realizar las recomendaciones para su óptimo desempeño [TDMJ].

El inversor es un elemento que puede verse sometido a condiciones anómalas de operación. Tal es el caso de la conexión de una carga que supera la potencia nominal del inversor o de un cortocircuito. De esto se destaca que la necesidad de protección contra sobrecarga y cortocircuito es incuestionable, así como también, la desconexión de la alimentación que puede ocurrir cuando el regulador desconecta la carga para proteger a la batería. Por tanto, esta protección parece muy necesaria cuando el inversor se conecta en los terminales de consumo del regulador de carga. Sin embargo, la protección contra inversión de polaridad es más controvertida, ya que esta

posibilidad sólo puede ocurrir durante la instalación o las tareas de mantenimiento del inversor, las cuáles suelen ser realizadas por personal cualificado. Tales situaciones son potencialmente peligrosas no sólo para el inversor sino también para las cargas. La Tabla XXI muestra los resultados de ensayos realizados a inversores sometidos a estas condiciones anómalas de operación [TDMJ].

Inversor	Condición ensayada				Leyenda
	SC	CC	DA	IP	
I1	Sí	Sí	Sí	Sí	Protección ensayada: SC Sobrecarga. CC Cortocircuito. DA Desconexión de la alimentación. IP Inversión de la polaridad de entrada.  Resultados: Sí El inversor supera el ensayo. No El inversor no supera el ensayo. NE No ensayado. NP No protegido, según las indicaciones del fabricante.
I2	Sí	Sí	Sí	NP	
I3	Sí	Sí	Sí	Sí	
I4	Sí	Sí	Sí	Sí	
I5	Sí	Sí	Sí	No	
I6	Sí	Sí	Sí	Sí	
I7	Sí	Sí	Sí	Sí	
I8	Sí	NE	No	Sí	
I9	Sí	No	Sí	NP	
I10	Sí	Sí	Sí	Sí	
I11	Sí	Sí	Sí	No	
I12	Sí	Sí	NE	NP	
I13	Sí	Sí	NE	NP	
I14	Sí	Sí	NE	NP	
I15	Sí	Sí	NE	NP	
I16	Sí	Sí	NE	NP	

*Tabla XXI. Ensayos de fiabilidad a inversores de diversos fabricantes [TDMJ].*

Basándose en los resultados de la tabla XXI, podemos ver como la mayoría de los inversores están protegidos contra las situaciones anteriormente comentadas.

Se observa así de manera clara el requerimiento de protecciones eléctricas en los inversores en el proceso de su dimensionado y posterior adquisición. De forma especial en zonas tormentosas, también es recomendable asegurar la protección del inversor contra sobre-tensiones inducidas, tanto en el lado DC como en el AC, ya que los generadores fotovoltaicos y las líneas de distribución AC suelen contener grandes bucles de conductores donde pueden inducirse sobre-tensiones debido a la caída cercana de rayos.

En el caso particular expuesto en las entrevistas realizadas a EHAS, podemos destacar las recomendaciones hechas en la tabla XXII, basándose en la documentación consultada.

Fallos comunes	Causas	Recomendaciones
Reinicio constante.	Variación en el suministro, mal dimensionado, equipo de bajo nivel	Verificar el estado del regulador, consideración de recambio por otra tecnología (onda senoidal pura)
Potencia evidentemente inferior a la nominal.	Mal dimensionado	Re dimensionar y tomar en cuenta el factor presente en la mayoría de los elementos del sistema.
Eficiencia en torno al 50%.	Tecnología poco viable, mal dimensionado.	Cambio de tecnología (onda senoidal pura)
Rápida saturación y consecuente interrupción del suministro.	Incremento en la carga, mal dimensionado, tecnología poco viable	No exceder el nivel de potencia requerido por la carga en el dimensionado, cambio de tecnología.
Daño a monitores LCD y partes de ordenadores.	Tecnología poco viable	Cambio de tecnología.

*Tabla XXII. Datos de fallos en inversores en operación en instalaciones de EHAS.*

Como se puede observar en la tabla anterior, estos fallos por lo general, se deben al tipo de inversor seleccionado. Los inversores de onda cuadrada son más económicos, pero también los menos eficientes [TDSL], producen demasiados armónicos que generan interferencias (ruidos) y actualmente no se recomiendan para instalaciones fotovoltaicas profesionales, ya que sus características y pocas funcionalidades no se adaptan a las necesidades actuales de las cargas y el sistema.

Los inversores de onda cuadrada modificada son más sofisticados y caros que los anteriores, utilizan técnicas de modulación de ancho de impulso. La tendencia actual indica que dentro de muy poco tiempo, el coste de los inversores de onda senoidal se acercará mas al de los otros, popularizándose su instalación y haciendo que aumente su uso en estas instalaciones [TDSL].

Los inversores de onda senoidal pura son los más sofisticados del mercado actual. Diseñados para reproducir la energía suministrada por las compañías eléctricas, la onda sinusoidal es la mejor forma de onda eléctrica para alimentar equipos electrónicos más sofisticados. Los inversores de onda sinusoidal eliminan los problemas de rendimiento e incompatibilidad. Últimamente se han desarrollado nuevos inversores de onda senoidal con una eficiencia del 90% o más [TDSL].

Como soporte a esto, en la tabla XXIII, se muestra una comparativa entre los tipos de inversores en el mercado.

	Onda cuadrada	Cuadrada modificada	Senoidal pura
Rendimiento	Bajo	Medio-Alto	Alto
Ruido	Alto	Medio-bajo	Bajo
Precio	Económico <500\$	Competitivo 500-1500 \$	Alto >1500 \$
Presencia en el mercado	Se comercializan muy pocos	Ampliamente comercializados	Mediana demanda

Tabla XXIII. Comparación de inversores [WEB-STTS].

Los inversores de onda cuadrada son los menos eficientes y debido a las variaciones a las que están sometidas las cargas, esto traduce en un menor rendimiento del sistema, por lo que lo recomendado es el reemplazo de estos inversores por los de onda senoidal o los de onda senoidal modificada.

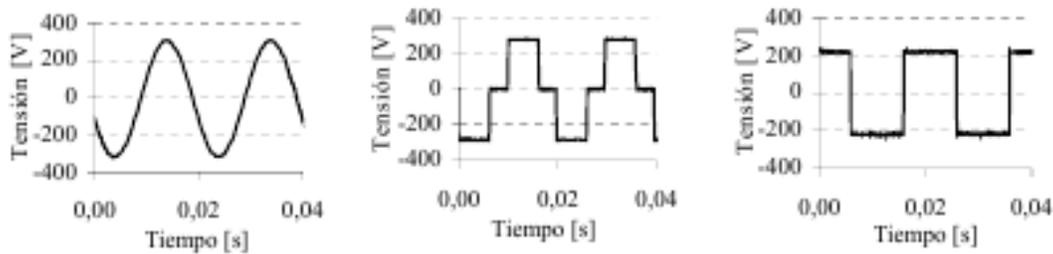


Figura 34. Diferentes formas de ondas que ofrecen los inversores.

Con estas consideraciones la recomendación que se hace en las situaciones de entornos rurales extremos, es el empleo de inversores de onda senoidal pura, ya que como se ha explicado anteriormente los inversores de onda cuadrada generan continuos fallos representativos en el sistema que al ser valorados pueden ser equivalentes al uso de un inversor de onda senoidal pura.

### 3.1.7. Cableado y accesorios.

A pesar de no haber encontrado datos representativos sobre la fiabilidad del cableado en instalaciones fotovoltaicas autónomas, ni referencias a posibles problemas sobre el sistema, se han tomado en cuenta las recomendaciones de grosor y calidad para prolongar su duración y así, evitar los posibles fallos debidos más a causas accidentales (cortocircuitos, fuente de calor cercana, etc.). El empleo de cableado y accesorios adecuado, estandarizado y certificado permite que la transmisión de corriente entre los elementos de generación, almacenamiento y regulación,

hasta la salida hacia el consumo, se logre de manera eficiente. Basándonos en diversas normativas técnicas especializadas detallaremos algunos de los aspectos más relevantes con respecto a estos elementos del sistema.

Las secciones de los conductores deben ser tales que las caídas de tensión en ellos sean inferiores al 3% entre el generador fotovoltaico y el regulador de carga, inferiores al 1% entre la batería y el regulador de carga, e inferiores al 5% entre el regulador de carga y las cargas.

A partir de estas consideraciones y apoyándonos en las referencias existentes [NTUSFV], las mínimas secciones de los cables en cada una de las líneas serán las siguientes:

- Del generador fotovoltaico al regulador de carga: 2,5 mm<sup>2</sup>
- Del regulador de carga a las baterías: 4 mm<sup>2</sup>
- Todos los cables deben respetar un código de colores y/o estar debidamente etiquetados.
- Los terminales de los cables no deben favorecer la corrosión que se produce cuando hay contacto entre dos metales distintos.

Existe un amplio material con regulaciones y normativas en este contexto que puede ser útil para lograr la optimización del sistema como la Norma Técnica Universal para Sistemas Fotovoltaicos [NTUSFV].

### **3.2. Propuestas específicas.**

Este apartado está orientado hacia las aplicaciones específicas de cada sistema de electrificación fotovoltaica, que en nuestro caso específico son las telecomunicaciones rurales.

Un dato importante a mencionar, es el tiempo medio de fallos. Se ofrece un valor de 13 años de tiempo medio entre fallos (MTBF) como representativo de los sistemas fotovoltaicos autónomos basado en datos de sistemas autónomos en EEUU [PSR]. Este valor indica que, cada año, falla 1 de cada 13 sistemas instalados. Se encuentran datos más preocupantes, con un 43% de los sistemas no operativos después de 3-4 años de la instalación o la aparición de problemas durante el primer año en el 46% de los sistemas [TDPD].

Se menciona, en estos casos, una falta de planificación del mantenimiento y la indisponibilidad de repuestos como causas del mal comportamiento. A partir de estas reflexiones, nace una serie de recomendaciones que pretenden cubrir estas problemáticas y ofrecer una vía para la optimización de estos sistemas.

### **3.2.1. Herramienta de recolección de datos.**

La extensión del uso de sistemas fotovoltaicos autónomos para la electrificación de zonas rurales sin acceso a la red convencional y el desarrollo de programas con un elevado número de instalaciones requiere dedicar un mayor esfuerzo a las tareas de evaluación y registro de datos de averías y mantenimiento. Si bien este tipo de información es aún insuficiente, es necesario promover, implantar y mantener una herramienta que permita la recolección de datos históricos para lograr tener una visión más amplia sobre los fallos y el comportamiento general del sistema de electrificación autónomo.

Este sistema nos debe permitir extraer de manera precisa los acontecimientos más relevantes de estos para luego poder analizarlos y obtener tendencias sobre el comportamiento de los sistemas y de los elementos que los conforman. Con esta información, poder ejecutar planes de mantenimiento específicos, prevenir reemplazos antes de que se deterioren por completo y desarrollar trabajos de investigación más detallados y acordes con la realidad específica de la zona que permitan obtener más soluciones que incrementan la optimización de estos sistemas.

El planteamiento se basa en dotar los sitios donde se encuentran los sistemas con un número determinado de formatos de recolección de datos (ver apéndices). Estas hojas son específicas de cada elemento que conforma el sistema autónomo. Se ha elaborado así mismo una hoja general del sistema donde se pretende recolectar toda la información concerniente a este.

A través de esta herramienta, los organismos que administran y mantienen estos sistemas podrán establecer directrices para que, se cumpla con lo establecido y se rellenen estas hojas de especificaciones. Tras un periodo de tiempo determinado (la propuesta inicial es de 6 meses), será posible recolectar estas hojas de formato rellenas y comenzar así, la creación de una base de datos sobre los sistemas autónomos desplegados.

Con esta información, será posible obtener gran cantidad información para trabajar en el sistema y sus opciones de mejora.

### 3.2.2. Plan general de mantenimiento.

Las discrepancias en el tiempo de parada de un sistema después de una avería y su puesta en marcha pueden ser significativas. La dependencia se establece entre un diverso número de factores tanto locales como particulares del programa de mantenimiento en concreto tales como:

- La dispersión geográfica de las instalaciones.
- La accesibilidad a las instalaciones.
- Los recursos destinados al mantenimiento.
- La formación técnica del personal involucrado.
- La disponibilidad de repuestos.
- El tipo de fallo, entre otros.

Cuando tiene lugar un fallo en el sistema, se pueden reconocer dos etapas fundamentales: preparación y reparación. En general la reparación propiamente dicha es rápida, ya que habitualmente consiste en el recambio de un equipo o algún ajuste que no requiere excesivo tiempo.

La preparación es la etapa más prolongada, ya que abarca todo lo relacionado con el aviso al técnico, la detección y diagnóstico del fallo, adquisición de repuestos en caso necesario e inicio de la reparación propiamente dicha, con el tiempo necesario para los desplazamientos [TDPD].

En la Tabla XXIV se muestran los escasos datos encontrados sobre tiempos de mantenimiento.

Ref. bibliográfica	Tiempo medio hasta reparación	Comentarios
EEUU <sup>38</sup>	3 a 9 meses	Falta de servicio técnico
EEUU <sup>39</sup>	63 días	

*Tabla XXIV. Datos encontrados sobre el mantenimiento de instalaciones de electrificación autónomas [TDPD].*

En lugares donde el acceso al mercado de productos fotovoltaicos es complicado, como el caso de los países en vías de desarrollo, un número de fallos mayores a la cantidad de repuestos disponibles de un determinado componente puede incrementar considerablemente el tiempo de mantenimiento. Al mismo tiempo, el propio almacenamiento de repuestos supone un coste adicional a considerar.

Elemento	% de repuestos sobre n° instalaciones	
	Indonesia <sup>13</sup>	Bolivia <sup>56</sup>
Módulos fv	0,4	----
Baterías	100 (2º-3º año)	----
Reguladores	4	2
Luminarias	10	5
Otros	----	10 (fusibles)

*Tabla XXV. Proporción de repuestos en almacén recomendados para proyectos de electrificación rural [TDPD].*

Reflexionando sobre lo expuesto anteriormente en la tabla XXV, se evidencia la utilidad que representa conocer estimaciones sobre número de repuestos que se considera necesario disponer en un almacén.

Es por todo esto que se propone establecer un programa de mantenimiento que permita elevar la fiabilidad, el rendimiento y el tiempo de operación de estos sistemas. Para ello es importante que además de los conocimientos técnicos adquiridos, se tenga en cuenta que cada elemento dentro del sistema necesita de un mantenimiento específico y orientado a su función específica.

A continuación se describen algunos trabajos necesarios para el mantenimiento acertado del sistema de electrificación autónomo.

- **Modulo:** requieren un mantenimiento muy escaso, debido a su propia configuración, por lo general no tienen partes móviles y las celdas y sus conexiones internas están encapsuladas en varias capas de material protector. Es conveniente hacer una inspección general 1 ó 2 veces al año: asegurarse de que las conexiones entre paneles y al controlador están bien ajustadas y libres de corrosión. En la mayoría de los casos, la acción de la

lluvia elimina la necesidad de limpieza de los paneles; en caso de ser necesario, simplemente utilizar agua y algún detergente no abrasivo.

- **Regulador:** Las operaciones que se pueden realizar son las siguientes: observación visual del estado y funcionamiento del regulador; comprobación del conexionado y cableado del equipo; observación de los valores instantáneos del voltímetro y amperímetro dando un índice del comportamiento de la instalación.
- **Batería:** es el elemento de la instalación que requiere una mayor atención, las operaciones usuales que deben realizarse son las siguientes:
  - Comprobación del nivel del electrolito (cada 6 meses aproximadamente): debe mantenerse dentro del margen comprendido entre las marcas de "Máximo" y "Mínimo". Si no existen estas marcas, el nivel correcto del electrolito es de 20 mm por encima del protector de separadores. Si se observa un nivel inferior en alguno de los elementos, se deben rellenar con agua destilada o desmineralizada. No debe rellenarse nunca con ácido sulfúrico o agua de consumo humano.
  - Al realizar la operación anterior debe comprobarse también el estado de los terminales de la batería; debe limpiarse de posibles depósitos de sulfato y cubrir con vaselina neutra todas las conexiones.
  - Medir de la densidad del electrolito (si se dispone de un densímetro): con el acumulador totalmente cargado, debe ser de 1,240 +/- 0,01 a 20 grados Celsius. Las densidades deben ser similares en todos los vasos. Diferencias importantes en un elemento es señal de posible avería.
- **Inversor:** Observación visual del estado y funcionamiento, comprobación del conexionado y cableado del equipo; observación de los valores instantáneos del voltímetro y amperímetro.
- **Cableado y accesorios:** Inspección visual de su estado y funcionamiento, comprobación de terminales, empalmes y sistemas de puesta a tierra.

Hemos definido este programa para una duración inicial de 1 año y de acuerdo a los objetivos cumplidos poder replicarlo por más tiempo y en otros sistemas y proyectos similares bajo las siguientes acciones.

- **Inspección a sitios;** Se prevé que al inicio del programa se realice una inspección técnica de los sitios donde se encuentran desplegados los sistemas a mantener.
- **Mantenimientos correctivos;** a los sistemas que se encuentren en mal estado y que necesiten alguna reparación urgente.
- **Mantenimientos preventivos;** el mismo se pretende realizar cada 6 meses en todos los sistemas de electrificación autónomos desplegados, de ser posible se pudiere adjuntar a algún plan de mantenimiento que mantenga el organismo o empresa.
- **Presentación de resultados;** luego de realizada la primera vuelta de mantenimientos, se prevé efectuar un informe sobre el estado del sistema que permita a los administradores del proyecto ver los beneficio de este plan de mantenimiento.

Con esta propuesta se pretende mejorar el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas ya instalados, a través de la puesta en práctica de este plan se podrá extender la vida operativa de los elementos y sistemas, así como, prevenir daños mayores en el suministro actual.



### **3.2.3. Herramienta de monitorización inalámbrica para sistemas de electrificación autónomos.**

El diagnóstico y control de un sistema de electrificación autónomo implica la monitorización de los dispositivos que lo conforman. Las particularidades de la topología de estas instalaciones plantean un escenario muy concreto. Como principal característica se destaca que, por lo general, los dispositivos que lo conforman se encuentran dispersos.

Tras conocer el funcionamiento de estos sistemas, evaluar la fiabilidad y calidad de sus componentes, se podrá llegar a un diseño universal que permitirá obtener sistemas de menor coste y mayor rendimiento. Para esto se propone desarrollar un sistema de monitorización en sistemas de electrificación rural fotovoltaica que permita la monitorización remota y la gestión de la instalación.

Una vez detectadas las variables que nos interese evaluar, se calculan los rangos de las magnitudes eléctricas y físicas que indican el estado del sistema, y se realiza la selección de los equipos en base a los criterios técnicos y económicos. Se seleccionaran los equipos que más se adecuen al sistema de monitorización. De esta forma se conforma un sistema fiable compuesto por sensores, transductores y un autómata programable.

Como resultado de esta propuesta se conseguirá la configuración de un sistema de monitorización para un sistema de electrificación autónomo determinado que pueda hacerse extensible a cualquier otro. De este modo, se obtendrá información sobre el modo de operación del sistema permitiendo mejorar la calidad del suministro eléctrico y también percibir las incidencias y fallos en tiempo real. Este sistema permitirá a su vez, realizar una gestión remota, controlando y optimizando la estrategia de funcionamiento del mismo.

Consideramos a este punto como uno de los más importantes de esta investigación, debido a las importantes carencias que en las áreas de mantenimiento, gestión y monitorización de estos sistemas existen.

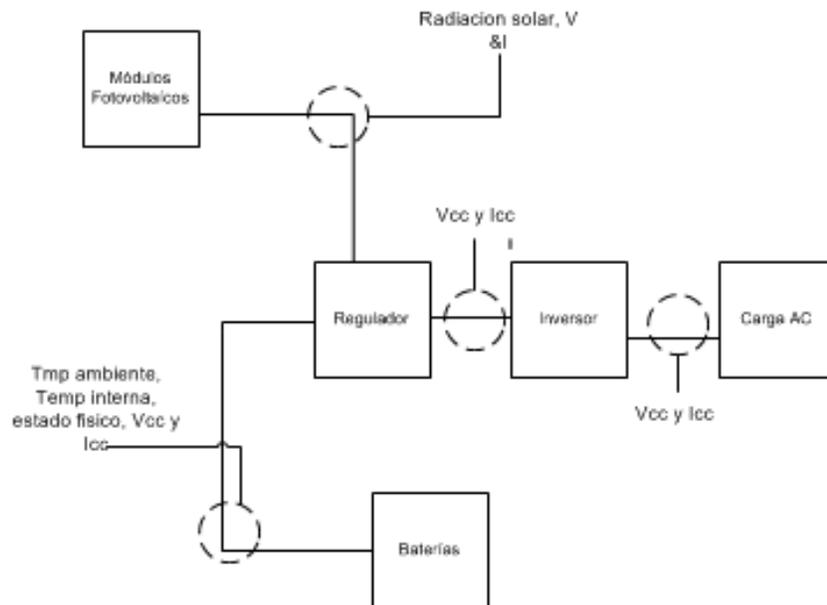
- **Proceso.**

El proceso de monitorización seguirá los siguientes pasos: los sensores captarán las variables de interés y transmitirán una señal analógica a un transductor. Los transductores se encargan de

convertir estas señales analógicas en señales digitales que sean descifrables para el PLC (Programable Logic Controller). El PLC será capaz de adquirir, almacenar y transmitir los datos enviados desde los transductores y permitirá controlar en tiempo real procesos secuenciales del sistema. También será capaz de transmitir los datos a un dispositivo de telecomunicaciones que los enviara a través de la tecnología deseada que más se adapte al entorno hasta el centro donde se encuentre el administrador del sistema donde serán analizados los datos obtenidos.

- **Parámetros medibles.**

Con estos datos se obtiene toda la información necesaria sobre el sistema, para ver el funcionamiento normal y las posibles incidencias que se produzcan en el. De la misma manera, se podrá tener información de los elementos que compone al sistema en tiempo real, lo que permitirá adaptar la estrategia de operación.



*Figura 36. Parámetros medibles del sistema.*

Las magnitudes importantes a registrar, pues aportan un valor significativo en cuanto al rendimiento y operación de cada elemento dentro del sistema, se destacan en la siguiente tabla.

Parámetros	Símbolo
Tensión y corriente CC en módulos fotovoltaicos	Vmfv, Imfv
Radiación solar y sombra en los módulos	Imfv, Smfv
Tensión y corriente CC en la entrada de las baterías	Vbat, Ibat
Estado físico de la batería	Iptv
Temperatura ambiente	Tamb
Temperatura de la batería	Tintb
Tensión y corriente en el regulador.	Vre, Ire
Tensión y corriente en el inversor.	Vin, In
Potencia entregada (total) por el sistema.	Pt

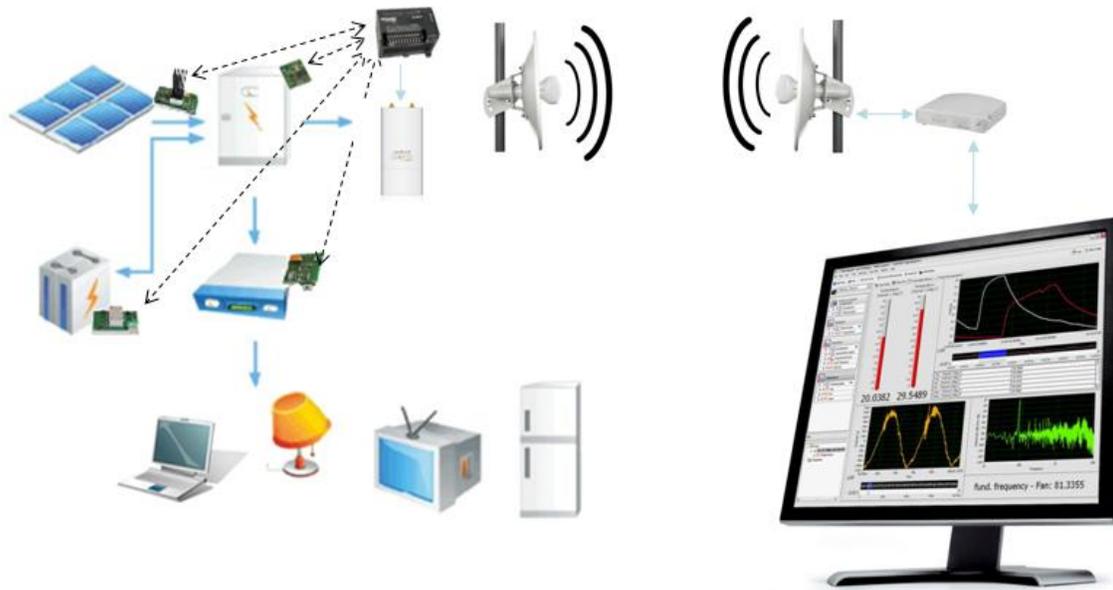
*Tabla XXVI. Parámetros a medir en la herramienta de monitorización.*

- **Recolección de datos.**

Para este apartado es importante decidir la periodicidad con la que se pretenden recoger los datos. Lo habitual en los datos meteorológicos que se usan frecuentemente para el modelado de instalaciones, es su registro cada hora. En este caso, los datos también son utilizados para el control de las mismas, por lo que para que éste sea lo suficientemente fino será necesario un periodo de muestreo bastante menor, del orden de la variación de los datos meteorológicos, la recomendación que se hace es de un periodo de entre 5 y 15 minutos dependiendo de la variable a evaluar.

- **Transmisión de datos.**

La transmisión de los datos permitirá recoger los datos con una periodicidad corta, visualizar en tiempo real el estado de la instalación y modificar algunos parámetros de las estaciones. Así, se podrán gestionar varias instalaciones desde un mismo lugar. Tras la captación de las variables a medir, la información será enviada a una unidad de procesamiento de datos. Los datos enviados llegarán al sitio del administrador de la red donde serán analizados, y así poder comprobar si la central monitorizada funciona correctamente.



*Figura 37. Diagrama de operación del sistema de monitorización.*

La tecnología propuesta para la transmisión de los datos desde el sistema hasta el sitio del administrador va a depender de la aplicación de telecomunicaciones para la cual este prestando servicio el sistema autónomo, las propuestas en este trabajo son:

WiLD: (WiFi for long distance) son modificaciones realizadas en el hardware y software de dispositivos 802.11 (a, b y g). Es un conjunto de estándares para redes inalámbricas basado en las especificaciones IEEE 802.11. Fue creado creó para ser utilizada en redes locales inalámbricas. Es frecuente que en la actualidad también se utilice para el acceso a Internet.

La tecnología Wi-Fi utiliza ondas de radio para transmitir datos. Requiere de un emisor y de uno o varios receptores. La señal se percibe correctamente mientras el receptor esté ubicado dentro de la zona de alcance de la red. Las modificaciones principales que se realizan en WiLD con respecto al estándar 802.11 son en parámetros tales como:

- Potencia de transmisión.
- Perdidas de propagación.
- Sensibilidad de receptores y margen de la señal.
- ACK timeout.

Esta tecnología está fuertemente ligada a las soluciones TIC4D usadas en numerosos proyectos de cooperación, de estos podemos mencionar a la fundación EHAS, este organismo hace uso de esta tecnología para la transmisión de sus datos así como también para la gestión de sus sistemas de telecomunicaciones, esto nos lleva que existe la posibilidad de hacer uso de la misma tecnología para la transmisión para los datos de la herramienta propuesta.

GSM: Hoy en día es una de las tecnologías de transmisión de datos inalámbricas más utilizada, debido a sus bajos costes en llamadas y a su sencillez de instalación, sólo es necesario conectar el registrador a una unidad GSM y asegurarse de la existencia de una buena cobertura.

Sistema Global para las Comunicaciones Móviles, formalmente conocida como "Group Special Mobile" (GSM, Grupo especial móvil) es un estándar mundial para teléfonos móviles digitales. Es el estándar predominante en Europa, así como el mayoritario en el resto del mundo.

GSM permite conexiones momentáneas a Internet a una frecuencia de 900 o 1800 MHz. La velocidad de transmisión es de 9,6 a 14,4 kbits/s. Mediante una simple mejora de red y sin más modificaciones, se puede utilizar GPRS o GSM2+. Estas tecnologías permiten una conexión permanente a Internet a la misma frecuencia que el GSM. Se basa en transmisión por paquetes a una velocidad de 40 a 115 kbits/s.

En proyectos desplegados en países donde la cobertura de la red GSM sea amplia puede ser muy factible su uso como plataforma inalámbrica para la transmisión de los datos de la herramienta.

Existen proyectos TIC de empresas cuyas instalaciones se encuentren desplegadas en entornos ideales dentro de países desarrollados donde pudiere ser interesante la inclusión de esta tecnología como plataforma de transmisión de datos de la herramienta propuesta, una empresa que podríamos mencionar como ejemplo para esto sería la empresa Ingenova con proyectos desplegados en España donde la cobertura de GSM es importante.

- **Sensores y convertidores.**

La propuesta dicta que los equipos que se utilizarán serán convertidores de medida o transductores que transforman la energía eléctrica en señales analógicas de proceso aptas para el PLC. Las señales digitales serán adquiridas por el PLC que las procesará y las enviará al modem donde se producirá la transmisión de los datos.

Las características especiales a tomar en cuenta para estos convertidores al momento de la selección serán las siguientes:

- **Entrada:** El rango para el que ha sido diseñado el transductor.
- **Salida:** Señal que se obtiene en el convertidor. Existen varias, dependiendo del PLC que se vaya a utilizar
- **Alimentación auxiliar:** los convertidores necesitan ser alimentados independientemente para realizar su función, algunos se alimentan en corriente continua y otros en alterna, habrá que analizar la forma de alimentación a la hora de elegir los equipos.
- **Aislamiento:** Para obtener una medida real es necesario aislar la señal de entrada, la señal de salida y la alimentación auxiliar para que no haya interferencias.
- **Tiempo de respuesta:** Es el tiempo transcurrido desde que cambia el parámetro medido hasta que la salida obtenga el valor correspondiente y permanezca en él. Tiempos de respuesta lentos dificultan la detección de variaciones abruptas en el parámetro.
- **Medida del valor eficaz real:** El verdadero valor eficaz mide la forma de la onda completa, con distorsión armónica y perturbaciones. Se requieren equipos que midan este parámetro para ver la calidad de la onda que sale de los inversores.

Una muestra de las magnitudes a medir y sus respectivos sensores se establecen en esta propuesta, se presenta en la tabla XXVII.

Sensores	Tipos	Detalles
Sensores de radiación solar.	Sensor optoelectrónico o célula calibrada	Mide la densidad del flujo de radiación solar (Watts/m <sup>2</sup> ) soporte contra agua, sumergible y diseñado para el uso continuo a la intemperie.
	Sensor heliográfico térmico o piranómetro	Mide el flujo total (global: radiación directa +dispersión)
	Piroheliómetro	Mide el flujo solar directo
	Pirorradiómetro	Mide toda la energía radiante que recibe una superficie: radiación solar global y la radiación infrarroja que viene de la atmósfera
Sensores de temperatura.	Termoeléctricos (Termopares)	Mediciones estándares de temperatura
	De radiación (total)	Medir temperaturas muy elevadas, en atmósferas particulares, para temperaturas de superficie, para objetos en movimiento, en condiciones mecánicas difíciles, para un

		gran velocidad de repuesta a los cambios de temperatura
	Ópticos (o de radiación visible)	
	De resistencia	Mediciones estándares de temperatura y algunos son capaces de establecer medidas de caudal, nivel y vacío y análisis de la composición de gases,...
Sensores de humedad	De humedad relativa	Mide la humedad relativa de 10% a 95% con un error típico de $\pm 2\%$ RH a 55% RH. Mide temperatura ambiente de $-40^{\circ}\text{C}$ a $+100^{\circ}\text{C}$ con un error típico de $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$
Intensidad en paneles	DHR-100-C420	Estos equipos miden mediante el efecto Hall intensidades en alterna y continua, es una tecnología muy interesante puesto que no es necesario colocar un shunt (resistencia patrón). Utilizar un shunt implica romper el circuito de potencia, introduciendo pérdidas, por ello aunque no sea el equipo más económico es el que mejor garantiza la fiabilidad de la central.
Intensidad en baterías	DHR-200-C420	Con las mismas características que el equipo DHR-100-C420 pero con intensidad nominal de 200 A en continua.
Potencia activa ( $\cos\phi$ )	ZURC CW-M	Convertidor que mide potencia activa
Voltaje	ZURC modelo CV-D	Para medir la tensión en continua de 12 o 48V a la salida de los paneles y de las baterías
Estado físico visual de las baterías	minicámara de video IP	Elemento que permita la visualización a distancia de las baterías y de la zona donde se encuentran las mismas.

*Tabla XXVII. Propuesta de magnitudes a ser medidas en el sistema autónomo.*

La comunicación entre estos sensores y el equipo de adquisición de datos será a través de redes de sensores inalámbrica WSN<sup>21</sup> o Zigbee<sup>22</sup>, estándares muy útiles hoy en día para dar solución a un gran número de necesidades, desde información de edificios inteligentes, hasta recuperación ante desastres, comunicaciones inter-vehiculares, redes militares, redes de área personales, entre otras.

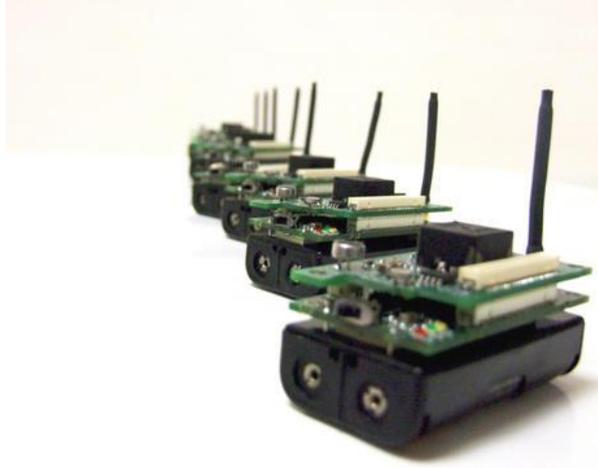
Una red de sensores inalámbrica (WSN) es un grupo de nodos (motas) que se coordinan para llevar a cabo una aplicación específica. Al contrario que las redes tradicionales:

- Los nodos son independientes, usan baterías para poder ser colocados en cualquier lugar.

<sup>21</sup> Wireless Sensor Networks

<sup>22</sup> Estándar para WSN IEEE 802.15.4

- Son de corto alcance en comunicación, por lo que se prevé un despliegue denso.
- Los nodos se comunican entre sí con sus transceptores, envían sus mensajes de enrutamiento y así encuentran un camino a la mota base, actualizando los datos recogidos.
- La mota base se conecta a una estación de trabajo en la que se analizan los datos y se monitorizará la red.



*Figura 38. Sensores inalámbricos.*

- **Equipos de control y adquisición de datos.**

La propuesta de la herramienta contempla el uso de un PLC (Programmable Logic Controller) con módulos de entradas analógicas para la recolección de señales. Un aspecto importante lo genera el consumo del PLC, tanto de la CPU como de la fuente de alimentación, ya que cualquier alteración en el modelado del sistema autónomo puede tener incidencias en el rendimiento del mismo. Se recomienda utilizar una fuente de alimentación que se adapte a los niveles de potencia que el sistema puede entregar. En la tabla XXVIII se muestran algunas fuentes de alimentación para PLC modulares que pueden ser usadas en la herramienta propuesta.

- **Potencia del sistema.**

Tras evaluar los componentes y los parámetros a medir, uno de los parámetros más importantes es el consumo del sistema. El nivel de energía requerida por cada elemento es determinante dentro de una estación de electrificación rural fotovoltaica.

En cuanto al consumo de los nodos, al ser la tecnología propuesta ZigBee, podemos decir que el consumo es un factor despreciable, esto es debido a que por lo general, estos sensores se alimentan de baterías acopladas (pilas AA o AAA acopladas al sensor). Por lo general, los protocolos ZigBee minimizan el tiempo de actividad de la radio para evitar el uso de energía. Los nodos sólo necesitan estar despiertos mientras se transmiten datos (además de cuando se les asigna tiempo para transmitir). Si no hay datos, el consumo es asimétrico repartido en dispositivos permanentemente activos y otros que sólo no están esporádicamente.

El uso de un mecanismo de control de consumo (tipo baliza) en la red, permitiría a todos los dispositivos saber cuándo pueden transmitir. En este modelo, los dos caminos de la red tienen un distribuidor que se encarga de controlar el canal y dirigir las transmisiones. Las balizas que dan nombre a este tipo de entorno, se usan para poder sincronizar todos los dispositivos que conforman la red, identificando la red domótica, y describiendo la estructura de la "supertrama". Los intervalos de las balizas son asignados por el coordinador de red y pueden variar desde los 15 ms hasta los 4 minutos.

El PLC es un elemento determinante, por lo que dependiendo del fabricante, el número de entradas y la CPU a utilizar, puede afectar el nivel de energía que entrega el sistema. La siguiente tabla muestra algunos niveles de potencia de varios modelos de PLC usados en sistemas de monitorización eléctrica a gran escala, que pueden dar una idea del consumo de este elemento propuestos para la herramienta de monitorización.

Modelo		Consumo a 5 V	Consumo a 24 V
CJ1M-CPU12/ CPU13		0.58 A	-
CJ1M-CPU22/ CPU23		0.64 A	-
Modelo		Consumo a 5 V	Consumo a 24 V
CJ1W-PA202	Salida de corriente máxima	2.8 A	0.4 A
	Salida de potencia máxima	14 W	
CJ1W-PA205R	Salida de corriente máxima	5.0 A	0.8 A
	Salida de potencia máxima	25 W	
CJ1W-PD025	Salida de corriente máxima	5.0 A	0.8 A
	Salida de potencia máxima	25 W	

*Tabla XXVIII consumo de la CPU del PLC.*

- **Coste del sistema.**

El coste es un parámetro importante que varía dependiendo del número de sensores, la electrónica, los fabricantes etc. Los costes de los sensores ZigBee pueden variar desde los 40 a 250€ y en el caso del PLC dependiendo de la velocidad del CPU, el número de entradas y el fabricante los precios varían desde los 100€ en adelante, a todo esto debe sumarse el coste del software de monitorización que puede variar dependiendo de, si se utiliza Open source (NI-DAQmx, Sci-lab, etc.) o propietario como Matlab-Simulink o Labview, cuyas licencias están el orden de los 250€ o más, dependiendo del tipo y de la cantidad de usuarios.

Por lo anteriormente expuesto podemos concluir que el coste de la herramienta sin incluir los costes supuestos del personal de programación, ingeniería e instalación oscilaría en el orden de los 1200€ a 1800€. En proyectos de envergadura, no representaría un impacto determinante en el presupuesto.

- **Análisis de la información obtenida.**

Tras analizar qué magnitudes ser importantes de medir, pues aportan un valor significativo en cuanto al rendimiento y operación de cada elemento dentro del sistema, se debe elegir un modelo de análisis de la información. La visualización e interpretación de los datos recogidos se realizará mediante un software especial elaborado para incorporar en una misma interfaz la de los sistemas desplegados en el proyecto donde se emplee.

La propuesta prevé que será necesario evaluar un software que se adapte al criterio del investigador y que permita la interacción entre el usuario y el sistema. Hoy en día existen numerosas aplicaciones y entornos que permiten programar este tipo de soluciones. Aunque no limita las líneas futuras de investigación, se recomienda hacer uso de la aplicación LabVIEW de National Instruments, que es una de las plataformas de software líder en la industria para sistemas de control, pruebas y diseño. También se barajan otros tipos de software matemáticos para realizar cálculos más precisos como Mathlab o Simulink. Para la realización de cálculos sencillos y representación de gráficas se puede utilizar MS Excel.

- **Funcionalidades de la herramienta.**

Algunas de las funcionalidades que pretendemos cubrir con esta solución son las siguientes:

- Información de la configuración de los elementos que forman parte del sistema:
- Datos sobre el número de elementos.
- Configuración de las distintas señales analógicas.
- Establecimientos de parámetros para la comunicación a través de la red
- Gráficos en tiempo real de cualquier variable, en puntos o barras.
- Monitorización del valor actual de cualquier variable.
- Situación del sistema o de alguna de sus partes: encendido, apagado, activo.
- Herramientas de análisis de los datos: Balances diarios, eficiencias, etc.
- Históricos de datos y representaciones gráficas.
- Acceso en tiempo real y de datos históricos a través de la Web.

Como reflexión final, se considera que esta propuesta de monitorización debe implementarse en un número muy reducido de sistemas de electrificación autónomos estratégicos, ya que se trata de una propuesta piloto. Sobre la base del análisis que arroje ese estudio específico se pueden trazar objetivos de mejora en los demás sistemas implantados en la red.

El coste de la herramienta queda justificado a corto plazo, ya que al monitorizar un sistema de electrificación piloto los resultados obtenidos pueden replicarse a los demás sistemas que conformen la red de electrificación fotovoltaica de entorno similar. Con esto, será posible anticiparse a fallos mayores que degraden la fiabilidad de la red y aumenten el coste del sistema. Además, de los resultados que se obtengan, se podrán efectuar planes de mantenimiento y sustitución de equipos que permitan optimizar el funcionamiento de los sistemas actuales y con ello los niveles de servicio de la red de telecomunicaciones.

#### **4. CONCLUSIONES.**

El desarrollo de esta investigación permitió proponer un compendio de soluciones que permitirán mejorar el estado actual de los sistemas de electrificación autónomos de los equipos de telecomunicaciones en entornos rurales aislados.

Se ha obtenido información directa de la problemática de los equipos de electrificación rural fotovoltaica para aplicaciones de telecomunicaciones rurales. A través de numerosa fuentes bibliográficas.

Así mismo, se ha contactado de manera directa con organismos y empresas que trabajan en este sector para recabar información actualizada sobre las necesidades reales.

Con la información obtenida, Se proponen los siguientes desarrollos para la optimización de los mencionados sistemas:

- Análisis y alternativas de elección de los diferentes elementos que conforman el sistema de electrificación.
- Herramienta de recolección de datos
- Plan general de mantenimiento
- Herramienta de monitorización inalámbrica para sistemas de electrificación autónomos

La adopción conjunta o separada de las diferentes propuestas conllevará una optimización de los actuales sistemas de electrificación fotovoltaica. En la actualidad es evidente la carencia de estas propuestas y es notable cómo afecta esto al desempeño de los sistemas. A través de la puesta en marcha de la recolección tanto manual como automática de datos, así como de la aplicación del adecuado y sistemático plan de mantenimiento propuesto, se lograrán resultados diferenciadores en el comportamiento de los actuales sistemas de electrificación autónomos, obteniendo así la optimización de los mismos.

## **5. LOGROS PRINCIPALES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.**

### **5.1. Logros principales.**

La realización de este proyecto fin de máster nos permitió conocer el estado actual de los sistemas de electrificación autónomos fotovoltaica y su situación particular ante las aplicaciones para soluciones y proyectos de TIC4D.

Por ser en su mayoría un trabajo de recolección de datos, ha sido preciso acceder a diversas fuentes de investigación, lo que nos ha permitido ver diversas perspectivas con respecto a la misma tecnología.

El principal logro es el descubrimiento de una necesidad real por parte de diversos organismos por mejorar la fiabilidad y el rendimiento de sus sistemas de autónomos de electrificación rural fotovoltaica, y propuestas de resolución de dicha necesidad: Monitorización, mantenimiento y gestión.

La propuesta de herramientas de monitorización del sistema, será de gran ayuda a los actuales y futuros proyectos que incluyan estos sistemas de electrificación y que justifiquen según su masa crítica de instalaciones un despliegue de una herramienta de este tipo. También se debe mencionar la propuesta del plan general de mantenimiento de sistemas de electrificación autónomos. Propuesta que de materializarse será reconocida como logro importante, ya que habremos sorteado el falso concepto que sostiene la no necesidad del mantenimiento de estos sistemas. Esta visión es lo que afecta considerablemente al despliegue de sistemas más eficientes en zonas aisladas. Este estudio trata de concienciar sobre la bondad de un adecuado plan de mantenimiento y gestión de cara a prolongar su tiempo de operación y mantener sus niveles de calidad y de fiabilidad.

### **5.2. Líneas futuras de investigación.**

En este apartado, se destaca la necesidad de realizar un trabajo de investigación detallado que permita ahondar más en las propuestas planteadas anteriormente. Este trabajo se llevaría a cabo en la realización de una tesis doctoral.

De todas estas propuestas planteadas las más significativas y con la necesidad de mayor desarrollo, son las del diseño e implantación de un sistema de monitorización de los sistemas de electrificación autónomos y la propuesta de elaboración de un programa general de mantenimiento para sistemas de electrificación autónomos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA.

1. [TDPD] Díaz Pablo. Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos: “Aplicación a la electrificación rural”. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Abr 2003.
2. [TDSL] Sifeddine Labed, Contribución al desarrollo de métodos para la electrificación rural fotovoltaica a gran escala. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
3. [MET-BA] Bavaresco de pietro, a. M. (1997).
4. [MET-PRESS] Pressman Roger, (1996).
5. [MET-BATES] Bates, Tony (2001). Cómo gestionar el cambio tecnológico. Gedisa Editorial.
6. [MET-CHA] Chávez Nilda (1994). Introducción a la investigación educativa.
7. [TDMJ] Muñoz Cano Javier, Recomendaciones sobre el uso de Corriente alterna en la Electrificación rural Fotovoltaica. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Sep. 2004.
8. [GTRP] Grupo de TIC4D Rurales. Redes Inalámbricas para zonas rurales. Pontificia Universidad Católica del Perú, Ene 2008.
9. [JRCSR] JRC European commission. Photovoltaic solar energy development and current research. PV Status Report 2009.
10. [IAASIF] ASIF, Hacia la consolidación de la energía solar fotovoltaica en España. Informe Anual 2009
11. [TPM-1-2003] S. von Aichberger, ‘In controllers we trust: Market survey on charge controllers’, Photon International: The Photovoltaic Magazine, 1/2003.
12. [PPRA] (R. Zilles, E. Lorenzo y R. Serpa, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 8, 421-434, 2000.
13. [TPM-7-2002] S. von Aichberger. Photon International: The Photovoltaic Magazine, 7/2002.

14. [HB] H. Bode, 'Lead-acid batteries', Wiley Interscience, 1977
15. [PIIP] G. Bopp, H. Gabler, K. Preiser, D.U. Sauer y H. Schmidt. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 6, 271-291, 1998
16. [HTB-10-2002] Hojas técnicas de baterías Hoppecke modelo Energy, de tipo solar modificada, <http://www.jhroerden.com>, Octubre 2002.
17. [TDHAM] J.M. Huacuz, R. Flores, J. Agredano y G. Munguía, 'Field performance of lead-acid batteries in photovoltaic rural electrification kits', Solar Energy, 55, 4, 287-299, 1995.)
18. [SRM] M. Macagnan, E. Lorenzo y C. Jimenez, 'Solar Radiation in Madrid', Int. J. Solar Energy, 16, 1-14, 1994.).
19. [IDH-PNUD] Informe sobre desarrollo humano 2007-2008- PNUD.
20. [EIFVSA] Estudio de mercado de instalaciones Fotovoltaicas en España-deSOLaSOL.
21. [MSFV] Héctor L. Gasquet. -"Manual sobre los sistemas fotovoltaicos- Capitulo 06- baterias.
22. [NTUSFV] Universal Technical Standard for Solar Home Systems" Thermie B SUP 995-96, EC-DGXVII, 1998.
23. [PEC] El estado actual del uso de la energía solar en el Perú. Perú económico, Lima, Vol. XXIX, Nr.11, Nov. 2006: Los retos energéticos del Perú, pág. 10 – 11.
24. [APRWC] Análisis del proyecto de red Wilay Cuzco EHAS-GTRPUCP
25. [RCFR] Retratos de la conexión fotovoltaica a la red (III), Eduardo Lorenzo, Instituto de Energía Solar 2003
26. [EIC] Encuesta a personal de INGENOVA Consulting.
27. [ELC-EHAS] Entrevista Luis Camacho-EHAS
28. [EPD-UA] Entrevista a Pablo Días Villar.

29. [EEIC] Encuesta a personal de EHAS y GTRPUCP.
30. [ESAF] Experiencia de instalación de sistemas fotovoltaicos aislados en la zona alta andina de la región Tacna-Simposio 2009.
31. [ESTMISH] P.R. Mishra y J.C. Joshi, 'Reliability Estimation for Components of Photovoltaic Systems', Energy Conversion Management, 37(9), 1371-1382, 1996.
32. [BDREG] MIL-HDBK-217F, 'Reliability Prediction of Electronic Equipment', Military Handbook, U.S. Department of Defense, 1991.
33. [PSR] A.B. Maish, C. Atcitty, S. Hester, D. Greenberg, D. Osborn, D. Collier y M. Brine, 'Photovoltaic System Reliability', Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim CA, 1997.

#### **6.1. Sitios WEB:**

1. [WEB-JRC] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eur.htm#ES>
2. [SSDC] <http://www.sitiosolar.com>
3. [WEBSAEC] <http://saecsaenergiasolar.com/>
4. [WEB-SOLUCAR] <http://www.solucar.es>
5. [WEB-MINEM-PE] <http://dger.minem.gob.pe/atlassolar/#>
6. [WEB-EFV] [http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/la-ateria\\_29.html](http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/la-ateria_29.html)
7. [WEB-RPM] <http://www.sfe-solar.com>
8. [WEB-UJAEN] <http://www.ujaen.es/investiga/solar.htm>
9. [WEB-VHZ] <http://www.vzh.com.ar/newsletters/newsletters-nota-010-02.html>
10. [WEB-WKP] [http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%A1Da\\_%28electricidad%29](http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%A1Da_%28electricidad%29)
11. [WEB-PHW] [www.Photowatt.com](http://www.Photowatt.com)
12. [WEB-STTS] <http://store.solar-electric.com/xaxwhyin.html>

## 7. APÉNDICES.

- **Apéndice 1. Hoja de evaluación para sistema de electrificación autónomo.**

Logo e identificador

### Evaluación del sistema

Proyecto : \_\_\_\_\_

Ubicación del SAERF: \_\_\_\_\_

Localidad de la instalación: \_\_\_\_\_

Responsable de la instalación: \_\_\_\_\_

Identificador del SAERF: \_\_\_\_\_

Fecha de Observación: \_\_\_\_\_

Detalles de la Instalación: \_\_\_\_\_

Periodo de Observación: Desde: \_\_\_\_\_  
Hasta: \_\_\_\_\_

Temperatura: \_\_\_\_\_

Indice de radiación solar: \_\_\_\_\_

Fecha de la ultima falla conocida: \_\_\_\_\_

Potencia que entrega: \_\_\_\_\_

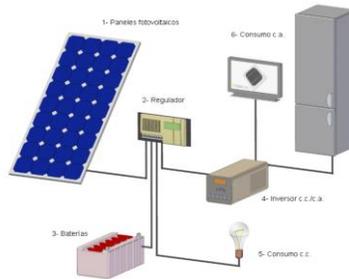
Fecha de la ultima revisión: \_\_\_\_\_

Equipos que soporta: \_\_\_\_\_

Fecha del ultimo mantenimiento: \_\_\_\_\_

SPT: \_\_\_\_\_

Distancia hasta la toma primaria mas cercana: \_\_\_\_\_



Componentes del sistema:

Componentes	Cantidad (s)	Marca(s)	Modelo (s)	Tiempo de vida	Presencia de daños	Otros detalles

Detalles : \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

- **Apéndice 2. Hoja de seguimiento para la evolución histórica de los módulos fotovoltaicos.**

Logo e identificador

## Evaluación componentes: Modulos FV

Proyecto : \_\_\_\_\_ Ubicación del SAERF: \_\_\_\_\_

Localidad de la instalación: \_\_\_\_\_ Responsable instalación: \_\_\_\_\_

Identificador del SAERF: \_\_\_\_\_ Fecha de Observación: \_\_\_\_\_

Características físicas: \_\_\_\_\_ Temperatura: \_\_\_\_\_

En Instalacion	Excelente	Bien	Regular	Deficiente	Malo
Estado fisico general	<input type="checkbox"/>				
Estado del Encapsulado	<input type="checkbox"/>				
Estado de las celdas	<input type="checkbox"/>				
Estado del Diodo de Bloqueo	<input type="checkbox"/>				

	Nada	Muy poca	Poca	Mucha	Excesiva
Presencia de humedad	<input type="checkbox"/>				
Corrosión	<input type="checkbox"/>				

En Operacion	Excelente	Bien	Regular	Deficiente	Malo
Estado fisico general	<input type="checkbox"/>				
Estado del Encapsulado	<input type="checkbox"/>				
Estado de las celdas	<input type="checkbox"/>				
Estado del Diodo de Bloqueo	<input type="checkbox"/>				

	Nada	Muy poca	Poca	Mucha	Excesiva
Presencia de humedad	<input type="checkbox"/>				
Corrosión	<input type="checkbox"/>				

En Presencia de fallas	Excelente	Bien	Regular	Deficiente	Malo
Estado fisico general	<input type="checkbox"/>				
Estado del Encapsulado	<input type="checkbox"/>				
Estado de las celdas	<input type="checkbox"/>				
Estado del Diodo de Bloqueo	<input type="checkbox"/>				

	Nada	Muy poca	Poca	Mucha	Excesiva
Presencia de humedad	<input type="checkbox"/>				
Corrosión	<input type="checkbox"/>				

### Características Electricas

#### Valor Inicial

Modulo FV	Tipo de Modulo	Valor Real (watt)	Valor Nominal (watt)	P0-Pnom/Pnom (%)

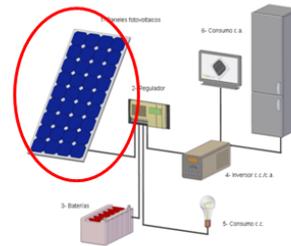
#### Perdida por Degradación

	Tipo de Modulo	Años de operación	Po (watt)	Degradación por año
1 año				
2 años				
5 años				
10 años				
20 años				

### Características de instalacion y Mtto

	Nada	Muy poca	Poca	Mucha	Excesiva
Sombreado de módulos.	<input type="checkbox"/>				
Bloqueo por Posicionamiento	<input type="checkbox"/>				
Efectos de la suciedad	<input type="checkbox"/>				

Detalles: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



• **Apéndice 3. Hoja de seguimiento de la evolución histórica de las Baterías.**

Logo e identificador

## Evaluación componentes: Baterías

Proyecto : \_\_\_\_\_

Ubicación del SAERF: \_\_\_\_\_

Localidad de la instalación: \_\_\_\_\_

Responsable de la instalación: \_\_\_\_\_

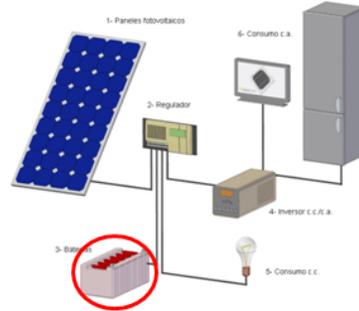
Identificador del SAERF: \_\_\_\_\_

Fecha de Observación: \_\_\_\_\_

Temperatura: \_\_\_\_\_

Estado físico general de la batería al momento de la instalación.

Batería-Marca- Modelo	Corto-circuito externo de los terminales de conexión.	Bajo nivel del electrolito.



Capacidad de almacenamiento de la batería en tiempo de operación.

Batería	Tipo de Batería	Marca	Modelo	Tiempo de Operación

Capacidad de batería suministrada.

Batería-Marca- Modelo	Tipo de Batería	Valor Real (watt)	Valor Nominal (watt)	P0-Pnom/Pnom (%)

Evaluación de pérdida de capacidad progresiva.

Batería-Marca- Modelo	Gaseo.	Corrosión.	Estratificación n.	Sulfatación.	Precipitación de materia act.	Efecto de la temperatura.
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				

Detalles: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

- **Apéndice 4. Hoja de seguimiento para la evolución histórica del Regulador.**

Logo e identificador

## Evaluación componentes: Regulador

Proyecto : \_\_\_\_\_ Ubicación del SAERF: \_\_\_\_\_

Localidad de la instalación: \_\_\_\_\_ Responsable de la instalación: \_\_\_\_\_

Identificador del SAERF: \_\_\_\_\_ Fecha de Observación: \_\_\_\_\_

Marca: \_\_\_\_\_ Modelo: \_\_\_\_\_ Temperatura del sitio: \_\_\_\_\_

Inspección visual:  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

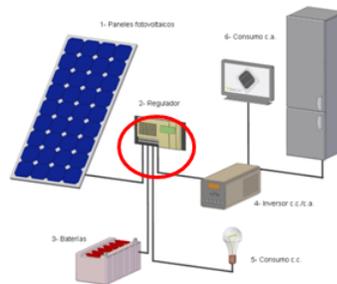
### Revisión general

Reguladores	Marca/Modelo	Umbral de regulación	Corriente de Autoconsumo (mA)	Posee Protecciones (sobre tensiones, situación sin batería, inversión de polaridad, CC)
				SI <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
				SI <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
				SI <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
				SI <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>

### Revisión frente a un fallo:

Reguladores	Marca/Modelo	Fecha de instalación	Cant. De Fallos	Tipo de Incidencia

Otros Detalles:  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



- **Apéndice 5. Hoja de seguimiento para la evolución histórica del inversor.**

Logo e identificador

## Evaluación componentes: Inversor

Proyecto : \_\_\_\_\_

Ubicación del SAERF: \_\_\_\_\_

Localidad de la instalación: \_\_\_\_\_

Responsable de la instalación: \_\_\_\_\_

Identificador del SAERF: \_\_\_\_\_

Fecha de Observación: \_\_\_\_\_

Marca: \_\_\_\_\_ Modelo: \_\_\_\_\_

Temperatura: \_\_\_\_\_

Inspección visual:

---



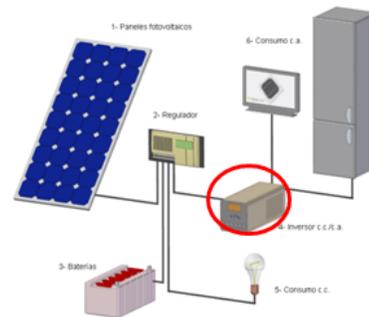
---



---

Evaluación del dispositivo en funcionamiento:

Inversor	Tipo de Inversor	Potencia nominal	Potencia de salida	Potencia requerida por la instalación(carga) Watts



Evaluación de fallos en transmisión de corriente:

Inversor	tipo	Detalles de la falla

Otros Detalles:

---



---



---

- **Apéndice 6. Modelo de encuesta realizada.**

**Hoja de Evaluación del los sistemas de electrificación rural fotovoltaica y las problemáticas más comunes que presentan.**

Utilice esta hoja de evaluación histórica para describir las principales fallas y necesidades que amerita su sistema de electrificación autónomo para optimizar su funcionamiento. Este formulario se utilizara para documentar el proyecto fin de máster “Optimización de los sistemas rurales fotovoltaicos para aplicaciones de telecomunicaciones rurales” desarrollado dentro del marco del Máster COMPAD de la URJC. Toda la información descrita a continuación será utilizada de manera estrictamente académica.

**Identificación del Sistema.**

- Nombre de la organización:
- Proyecto:
- Detalles del proyecto:
- Fecha de instalación:

Componentes	Marca	Modelo	Cantidad	Detalles
Modulo				
Batería				
Regulador				
Inversor				
Cableado				

**Cuestionario.**

¿Posee algún registro histórico de datos que refleje la evolución del sistema?

Si  No  N/R  Detalles: \_\_\_\_\_.

¿Posee algún sistema de monitorización que permita gestionar el Sistema?

Si  No  N/R  Detalles: \_\_\_\_\_.

¿Está satisfecho con el desempeño del sistema en la aplicación que lo utiliza?

Si  No  N/R  Detalles: \_\_\_\_\_.

¿Cuántas averías han presentado su sistema autónomo en el último año?

Si  No  N/R  Detalles: \_\_\_\_\_.

¿Se han incrementado la cantidad de averías del sistema autónomo con el tiempo de operación?

Si  No  N/R  Detalles: \_\_\_\_\_.

¿Cree usted que es necesario gestionar el funcionamiento de su sistema autónomo a través de algún sistema de monitorización?

Si  No  N/R  Detalles: \_\_\_\_\_.

Otros detalles que quiera agregar a este cuestionario:

---

---

- **Apéndice 7. Modelo de entrevista realizada.**

**Entrevista de aportación al Proyecto de Optimización de los sistemas de electrificación autónomos usados en aplicaciones de telecomunicaciones.**

Datos del entrevistado:

Resumen del investigador.

Preguntas.

*¿Cuáles, considera que han sido las aportaciones más significativas de la energía solar fotovoltaica, en especial las correspondientes a los sistemas de electrificación autónomos, hoy en día?*

*¿Cómo ve el panorama de los sistemas de electrificación rural de hoy día?*

*¿De los elementos que conforman un sistema de electrificación autónomo (modulo, batería, regulador, inversor, cableado y carga) cual piensa usted que esta menos posicionado frente al resto de los componentes en materia de rendimiento y que acciones recomendaría ejercer para mejorarla con respecto al resto de elementos?*

*¿Qué aspectos piensa que se deben mejorar para obtener un mayor rendimiento de estos sistemas?*

*¿Cree usted viable que ONGDs y empresas privadas, usen alguna herramienta (sistemas de monitorización, plan de mantenimiento, sistemas de recolección de datos, entre otros)) para optimizar sus sistemas autónomos actuales?*

*¿Conociendo la realidad actual de las ONGDs y desplegadas en zonas rurales, piensa que estas herramientas pueden mejorar el rendimiento de sus sistemas autónomos y a la vez el de sus soluciones de telecomunicaciones?*

*¿Qué otras aportaciones recomendaría para mejorar el rendimiento actual de los sistemas autónomos?*