



MII – MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Electrificación de la última milla mediante Sistemas Fotovoltaicos Aislados

Autor: Isabel Sanjuán Aguar
Director: Julio Eisman Valdés
Co-director: Miguel Arjona Torres

Trabajo Final de Máster

Madrid
Julio, 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Electrificación de la última milla con Sistemas Fotovoltaicos Aislados
(SFA)

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/2023 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Isabel Sanjuán Aguar

Fecha: 19/07/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Julio Eisman Valdés

Fecha: 19/07/2023



MII – MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Electrificación de la última milla mediante Sistemas Fotovoltaicos Aislados

Autor: Isabel Sanjuán Aguar
Director: Julio Eisman Valdés
Co-director: Miguel Arjona Torres

Trabajo Final de Máster

Madrid
Julio, 2023

ELECTRIFICACIÓN DE LA ÚLTIMA MILLA MEDIANTE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS

Autor: Sanjuán Aguar, Isabel

Director: Eisman Valdés, Julio

Entidad Colaboradora: Fundación Ingenieros ICAI

RESUMEN DEL PROYECTO

Para conseguir un acceso universal a la energía en 2030 se requiere que los procesos de electrificación se aceleren, especialmente en las comunidades rurales de difícil acceso y con bajos ingresos económicos. Este trabajo final de máster estudia la viabilidad, tanto técnica como económica, de proveer de electricidad a estas comunidades mediante sistemas fotovoltaicos aislados (SFA).

El trabajo se ha llevado a cabo durante la realización de unas prácticas en la fundación de Ingenieros de ICAI. En dichas prácticas, se ha elaborado una guía acerca de la mejor metodología para conseguir una electrificación universal. Esta colaboración ha permitido elaborar el presente trabajo final de máster, centrado en los aspectos técnicos de la electrificación, así como el correspondiente al MBA, centrado en los aspectos políticos y económicos.

El Anexo I del trabajo recoge la alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, mientras que el Anexo II muestra un catálogo de equipos eficientes que pueden ser empleados con SFA.

Palabras clave: sistemas fotovoltaicos aislados (SFA), electrificación de la última milla, acceso universal a la electricidad (AUE).

1. Introducción

En 2021 un total de 675 millones de personas no tuvieron acceso a la electricidad (IEA et al, 2023). En los últimos años, se ha producido una desaceleración en el proceso de electrificación, con un crecimiento de la tasa de acceso de 0,5 puntos entre 2018 y 2020, frente a 0,8 puntos entre 2010 y 2018 (ONU, 2022).

Muchas de las zonas que no cuentan con acceso a la electricidad suelen ser comunidades rurales que se encuentran en territorios alejados y que presentan niveles bajos de ingresos económicos. Este hecho dificulta todavía más su proceso de electrificación y supone un gran reto a la hora de elegir la infraestructura más adecuada para conseguirlo. Al conjunto de estas zonas que se ubican en países con tasas de cobertura eléctrica superiores al 80% y 90% se les llama “última milla”. El presente trabajo propondrá el uso de sistemas fotovoltaicos aislado (SFA) para conseguir su electrificación.

2. Definición del proyecto

Frente a la situación que se ha planteado en la introducción, nace la necesidad de lograr llevar la brecha a cero y conseguir que todas las personas tengan acceso a la electricidad de forma segura, asequible y sostenible.

Por este motivo, el proyecto estudiará la viabilidad de electrificar, mediante sistemas fotovoltaicos aislados, comunidades en la última milla. Concretamente, los temas que se tratarán a lo largo del documento son los siguientes:

- Evaluación de la problemática: en este capítulo se cuantificará el problema que el proyecto trata de resolver (los altos porcentajes de personas que viven sin acceso a la electricidad) y se expondrán los modos que existen actualmente para llevar la electricidad a estas personas (extensión de redes, minirredes y sistemas aislados).
- Nivel de acceso: se describirán los niveles de acceso definidos en el “marco de niveles múltiples” (Multi-Tier Framework, MTF) (ESMAP, 2015) y se discutirá cuál de ellos debe ser considerado como óptimo para dar acceso a la electricidad a una región.
- Dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos aislados: se hará un estudio de la evolución de los SFA y se realizará un dimensionado de los mismos para una demanda en concreto. Para poder estimar la demanda, se ha realizado un catálogo de equipos que podrían ser empleados por un hogar de la última milla.
- Modelos de suministro: se estudiarán los distintos modelos que permiten ofrecer estos sistemas en la última milla y se seleccionará el que se considere más adecuado en base a su sostenibilidad y asequibilidad.
- Planificación del acceso universal a la electricidad: la planificación de la electrificación es fundamental para garantizar que el acceso universal a la electricidad se logre de manera efectiva y sostenible, y para asegurarse de que se estén satisfaciendo las necesidades de las comunidades locales. Para ello, se requiere de una planificación integrada que permita la comparación de los tres modos de electrificación (extensión de red, minirredes y SFA), y elija aquella opción que presente un coste mínimo. En este capítulo se estudiarán diversas herramientas que permiten llevar a cabo esta planificación con éxito.
- Usos productivos y consideraciones de género: se evaluarán todos aquellos usos de la electricidad que permiten generar nuevos ingresos. Se clasificarán en 3 niveles: aquellos que derivan de la electrificación residencial, los estandarizados y usos productivos específicos, para los que se requiere una solución eléctrica concreta. Además, se analizará el impacto que tiene la electrificación en la igualdad entre géneros en países en desarrollo.
- Estudio económico: se estudiará la viabilidad económica a largo plazo de suministrar estos equipos desde el punto de vista del proveedor eléctrico.

3. Descripción del sistema

Para llevar a cabo el dimensionamiento del sistema, ha sido necesario, en primer lugar, determinar la demanda que dicho sistema va a satisfacer. Se ha hecho un estudio de los distintos niveles de acceso a la electricidad y se ha determinado cuál debe ser el óptimo para un hogar de la última milla. Una vez determinado, se han estudiado los equipos que pueden proporcionar dicho nivel de acceso. Para ello, se ha desarrollado un catálogo con los equipos de diferentes proveedores en una hoja Excel. Una vez seleccionados los equipos, se ha realizado el dimensionamiento del sistema fotovoltaico que permite ofrecer la energía requerida por los equipos. Se han planteado diferentes hipótesis y se ha tenido en cuenta la oferta del mercado para seleccionar el sistema final a emplear. Se trata de un sistema fotovoltaico aislado de tercera generación que funciona con corriente continua y sistema de pre-pago. Su esquema de funcionamiento es el siguiente:

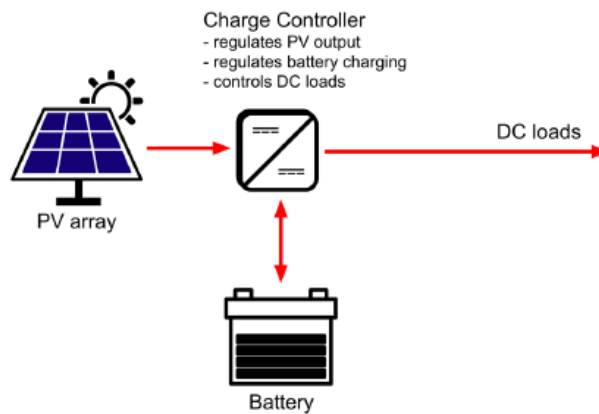


Ilustración R- 1. Esquema funcionamiento SFA en CC (Lighting Africa et al, 2023)

4. Resultados

Una vez realizado el dimensionamiento de los sistemas, se ha utilizado la herramienta PVGIS¹ para evaluar la calidad del servicio ofrecido y comprobar que proporciona la energía requerida por la demanda de acuerdo con el nivel de radiación solar de una zona concreta escogida como ejemplo. La siguiente imagen refleja, para la región seleccionada, la energía que cada sistema proporcionará a las cargas (directamente o a través de la batería) y la energía que no será capaz de capturar debido a que la batería está llena o a que las cargas no la necesitan.

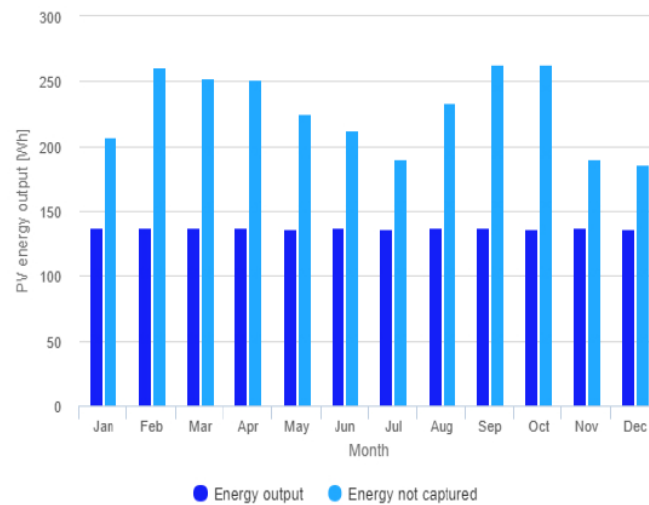


Ilustración R- 2. Calidad del servicio ofrecido con el sistema dimensionado

Por otro lado, los resultados del estudio económico llevado a cabo han permitido demostrar que proveer los sistemas es rentable económicamente en un plazo de 20 años.

5. Conclusiones

La realización del trabajo ha permitido demostrar la viabilidad, tanto técnica como **económica** de ofrecer el servicio eléctrico a las comunidades de la última milla mediante SFAs. El servicio ofrecido se corresponde con el nivel 3 de la escala MTF.

¹ https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/

Además, a lo largo del documento se ha analizado cómo debe estructurarse el modelo de negocio que permita ofrecer el servicio eléctrico, resumiéndose en los tres pilares siguientes:

Tecnológico: la electrificación debe realizarse mediante SFA de tercera generación en CC. Integrarán un sistema de prepago.

- Económico: se empleará el modelo “Energía como Servicio”, donde los usuarios pagarán por la disponibilidad de energía.
- Gestión: la gestión del proyecto incluirá distintos actores. Entre ellos destacan los Centros de Atención al Usuario (desde donde se gestionarán los pagos, entre otras tareas), el proveedor del servicio eléctrico y los comités de electrificación fotovoltaica (representarán a la comunidad de usuarios).

Centrarse en estos pilares puede establecer un modelo de negocio sostenible y efectivo para garantizar un acceso confiable y asequible a la electricidad para las comunidades de la última milla.

6. Referencias

ESMAP. (2015). *Beyond Connections. Energy Access Redefined*. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/248a7205-e926-5946-9025-605b8035ad95/content>

IEA, IRENA, United Nations Statistics Division, The World Bank, World Health Organization. (2023). *Tracking SDG7. The energy progress report 2023*. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/Tracking_SDG7_energy_progress_2023.pdf?rev=f937758f92a74ab7ac48ff5e8842780a

Lighting Africa, World Bank Group, Schatz Energy Research Center, ECREEE. (2023). *Requirements and Guidelines for installation of off-grid solar systems for public facilities*. <https://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2021/05/QualityAssurance-OffGridSolar-PublicFacilities-Nov2020.pdf>

ONU. (2022). *Energía asequible y no contaminante: por qué es importante*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/7_Spanish_Why_it_Matters.pdf

LAST MILE ELECTRIFICATION THROUGH SOLAR HOME SYSTEMS

Author: Sanjuán Aguar, Isabel

Supervisor: Eisman Valdés, Julio

Collaborating Entity: Fundación Ingenieros ICAI

ABSTRACT

In order to achieve universal energy access by 2030, electrification processes need to be accelerated, especially in hard-to-reach rural communities with low incomes. This master's thesis studies the technical and economic feasibility of supplying electricity to these communities using solar home systems (SHS).

The work has been carried out during an internship at the ICAI Engineering Foundation. During the internship, a guide was drawn up on the best methodology for achieving universal electrification. This collaboration has made it possible to prepare this Master's thesis, which focuses on the technical aspects of electrification, as well as the MBA thesis, which focuses on the political and economic aspects.

Annex I of the paper sets out the alignment of the project with the Sustainable Development Goals, while Annex II shows a catalogue of efficient equipment that can be used with SHS.

Keywords: solar home systems (SHS), last mile electrification, universal electricity access.

1. Introduction

In 2021 a total of 675 million people did not have access to electricity (IEA et al, 2023). In recent years, there has been a slowdown in the electrification process, with a growth rate of 0.5 points between 2018 and 2020, compared to 0.8 points between 2010 and 2018 (UN, 2022).

Many of the regions without electricity access are often rural communities located in remote areas with low economic incomes. This further complicates their electrification process and poses a significant challenge when choosing the most suitable infrastructure to achieve it. These regions are typically found in countries with electricity coverage rates above 80% and 90%. The collection of rural communities inhabiting these regions is referred to as the "last mile" communities, for whom the use of solar home systems (SHS) will be proposed to achieve electrification.

2. Definition of the project

Given the situation presented in the introduction, there is a need to close the gap and ensure that everyone has access to electricity in a safe, affordable, and sustainable manner.

For this reason, the project will study the feasibility of electrifying last mile regions through solar home systems. Specifically, the following topics will be addressed throughout the document:

Problem assessment: in this chapter, the problem that the project aims to solve (high percentages of people living without electricity access) will be quantified, and the

current methods for bringing electricity to these individuals (grid extension, mini-grids, and standalone systems) will be discussed.

- Access level: the access levels defined in the "Multi-Tier Framework" (MTF) (ESMAP, 2015) will be described, and the optimal level for providing electricity access to a region will be discussed.
- Sizing of the SHS: an analysis of the evolution of solar home systems will be conducted, and the sizing of these systems for a specific demand will be determined. To estimate the demand, a study of the equipment that could be used by a last mile household has been compiled.
- Supply model: different models that enable the provision of these systems in the last mile will be studied, and the most suitable model in terms of sustainability and affordability will be selected.
- Universal electricity access planning: electrification planning is crucial to ensure effective and sustainable universal electricity access and to ensure that the needs of local communities are met. Integrated planning that allows for comparison of the three electrification modes (grid extension, mini-grids, and solar home systems) is required, and the option with the lowest cost will be chosen. This chapter will explore various tools that facilitate successful planning.
- Productive uses and gender considerations: all electricity uses that generate new income will be evaluated and classified into three levels: those derived from residential electrification, standardized uses, and specific productive uses that require a specific electrical solution. In addition, the impact of electrification on gender equality in developing countries will be analyzed.
- Economic study: the long-term economic viability of supplying these systems from the perspective of the electricity provider will be studied.

3. Description of the system

To carry out the system sizing, it has been necessary to first determine the demand that the system will meet. A study has been conducted on the different levels of electricity access, and the optimal level for a last mile household has been determined. Once determined, the equipment that can provide that level of access has been studied. For this purpose, a catalog of equipment from different suppliers was developed in an Excel spreadsheet. After selecting the equipment, the sizing of the photovoltaic system was performed to meet the energy requirements of the equipment. Different assumptions were considered, taking into account the market supply, to select the final system to be used. The chosen system is a third-generation standalone photovoltaic system that operates with direct current. The operational scheme of the system is as follows:

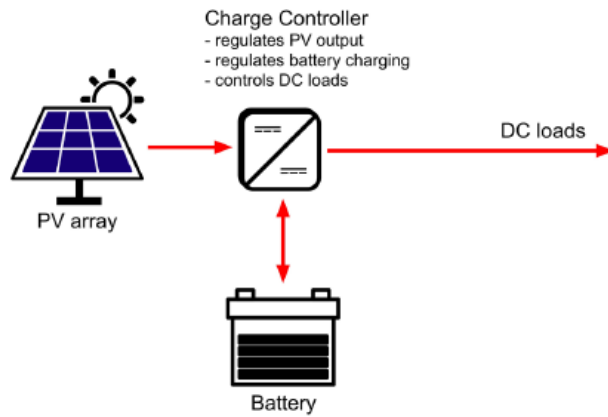


Ilustración R- 3. SHS scheme operating with DC (Lighting Africa et al, 2023)

4. Results

Once the system sizing was completed, the PVGIS tool² was used to assess the quality of the service provided and verify that it supplied the required energy for the demand. The following image illustrates, for the selected region, the energy that each system will provide to the loads (directly or through the battery) and the energy that will not be captured because the battery is full or the loads do not require it.

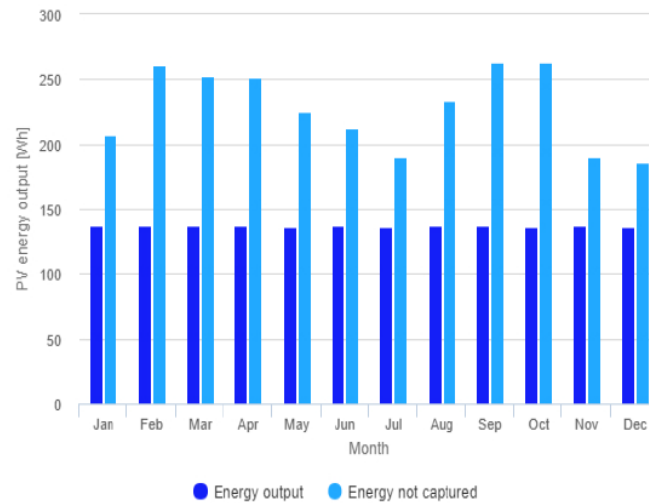


Ilustración R- 4. Quality of the service offered with the selected system

On the other hand, the results of the economic study carried out have shown that providing the systems is economically profitable within 20 years.

5. Conclusions

The completion of the work has demonstrated the technical and economic feasibility of providing electrical services to last mile communities. The service offered corresponds to the level 3 on the MTF scale.

² https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/

Furthermore, throughout the document, an analysis has been conducted on how the business model should be structured to provide electrical services, summarized in the following three pillars:

- Technological: Electrification will be carried out using third-generation standalone photovoltaic systems operating on DC. These systems will integrate a prepaid payment system.
- Economic: the "energy-as-a-service" model will be employed, where users will only pay for the energy they consume.

Management: project management will involve various stakeholders, including User Service Centers (responsible for payment management among others), the electricity service provider, and photovoltaic electrification committees (representing the community of users).

By focusing on these pillars, a sustainable and effective business model can be established to ensure reliable and affordable electricity access for last mile communities.

6. References

ESMAP. (2015). *Beyond Connections. Energy Access Redefined*. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/248a7205-e926-5946-9025-605b8035ad95/content>

IEA, IRENA, United Nations Statistics Division, The World Bank, World Health Organization. (2023). *Tracking SDG7. The energy progress report 2023*. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/Tracking_SDG7_energy_progress_2023.pdf?rev=f937758f92a74ab7ac48ff5e8842780a

Lighting Africa, World Bank Group, Schatz Energy Research Center, ECREEE. (2023). *Requirements and Guidelines for installation of off-grid solar systems for public facilities*. <https://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2021/05/QualityAssurance-OffGridSolar-PublicFacilities-Nov2020.pdf>

ONU. (2022). *Energía asequible y no contaminante: por qué es importante*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/7_Spanish_Why_it_Matters.pdf

Índice Memoria

1.	Problemática del acceso universal a la energía	8
1.1.	Cuantificación	8
1.2.	Estado de la cuestión.....	9
1.2.1.	Beneficios e impactos socioeconómicos de la electrificación.....	11
1.3.	Principios para la electrificación universal	13
1.4.	Electrificar la última milla con Sistemas Fotovoltaicos Aislados	13
2.	Niveles de acceso.....	16
2.1.	Descripción de los niveles	16
2.2.	Nivel de acceso básico	18
2.3.	Equipos consumidores eficientes	19
2.4.	Escalabilidad de los SFA	30
3.	Sistemas Fotovoltaicos Aislados: tecnologías, características y dimensionado.....	32
3.1.	Definición Sistemas Fotovoltaicos Aislados (SFA)	32
3.2.	Componentes de un SFA	36
3.2.1.	Bloque generador.....	36
3.2.2.	Bloque de acumulación	39
3.2.3.	Bloque de consumo	43
3.3.	Evolución de los SFA	43
3.4.	Mejoras en los componentes de los SFA	50
3.5.	Nivel de irradiación. Energía disponible	51
3.6.	Dimensionamiento de SFAs	54
3.6.1.	Propuesta de equipos para el bloque de consumo	55
3.6.2.	Dimensionado manual convencional.....	60
3.6.3.	Variaciones respecto al dimensionado convencional	64
3.6.4.	Comparación y dimensionado definitivo.....	66
3.6.5.	Validación de la calidad del dimensionado mediante PVGIS.....	67
3.7.	Calidad y normativa técnica	71
3.8.	Tecnología Pay as you Go (PAYG).....	74
3.8.1.	Problemática de la conectividad y sinergias con el acceso a la energía	75
4.	Modelos de suministro	77
4.1.	El papel del modelo de suministro en el proceso de electrificación	77
4.2.	Sostenibilidad y asequibilidad	77
4.3.	Comparación de Modelos desde relación económica con los clientes	79
4.3.1.	Venta de equipos	80
4.3.2.	“Energía como servicio”.....	82

4.4.	Comparación de modelos desde los objetivos de electrificación Universal	83
4.4.1.	El modelo del concesionario.....	83
4.4.2.	El modelo del distribuidor	84
4.5.	Elección del modelo.....	84
4.5.1.	Venta de equipos vs “energía como servicio”	84
4.5.2.	Concesionario vs Distribuidor	85
5.	Planificación de Acceso Universal a la Electricidad	86
5.1.	Planificación convencional	86
5.2.	Necesidad de una planificación integrada.....	86
5.3.	Asignación de responsabilidades	88
5.3.	Herramientas de planificación integrada	89
5.3.1.	GIS - Geographic Information Systems	89
5.3.2.	Modelo REM – Reference Electrification Model.....	90
6.	Usos productivos y consideraciones de género	95
6.1.	Definición y problemática.....	95
6.2.	Niveles	95
6.3.	Equipos	97
6.3.1.	Bombas de agua.....	97
6.3.2.	Cadena de frío.....	99
6.3.3.	Molino solar.....	100
6.3.4.	Cercas electrificadas	102
6.4.	Consideraciones de género	102
7.	Estudio Económico.....	105
7.1.	Hipótesis	105
7.2.	Coste Normalizado de la Inversión.....	105
7.3.	Costes normalizados Fijos y Operativos.....	110
7.4.	Ingresos Normalizados	116
7.5.	Resultado y conclusión	117
	Conclusiones.....	118
	Referencias	119
	Anexo I. Relación con Objetivos de Desarrollo Sostenible	129
	Referencias	130
	Anexo II. Catálogo de equipos en hoja Excel	131

Índice ilustraciones

Ilustración 1. Porcentaje de población con acceso a la electricidad (ONU, 2022a).....	8
Ilustración 2. Gráfico cobertura/pobreza Panamá 2019 (República de Panamá et al, 2022).....	14
Ilustración 3. Tasa de electrificación ALC por subregiones (OLADE et al, 2021)	15
Ilustración 4. Equipos disponibles en función nivel MTF (Bhatia & Angelou, 2015)...	17
Ilustración 5. Precio sistemas iluminación (Lighting Global, 2022).....	21
Ilustración 6. Relación TV con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021a).....	22
Ilustración 7. Relación tecnologías de la información y comunicación con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021c)	23
Ilustración 8. Comparación consumos radios, móviles y ordenadores (Efficiency For Access Coalition, 2021c).....	24
Ilustración 9. Relación ventiladores con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021d)	25
Ilustración 10. Tipos ventiladores (Efficiency For Access Coalition, 2021d)	26
Ilustración 11. Relación refrigeradores con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021e).....	26
Ilustración 12. Refrigeradores solares con batería vs. sin batería (Efficiency For Access Coalition, 2021e).....	27
Ilustración 13. Relación motores imán permanente con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021f).....	29
Ilustración 14. Comparación consumo motor de IP y de inducción (Nakuçi & Spahiu, 2018).....	30
Ilustración 15. Comparación ventiladores con motores de IP y con escobillas (Efficiency For Access Coalition, 2021b)	30
Ilustración 16. Configuración SFA en corriente continua (Lighting Africa et al, 2023) 33	
Ilustración 17. Configuración SFA en CC pero con alimentación de cargas en CC y CA (Lighting Africa et al, 2023).....	33
Ilustración 18. Configuración SFA en CA (Lighting Africa et al, 2023).....	34
Ilustración 19. Configuración acoplamiento CA (Lighting Africa et al, 2023)	35
Ilustración 20. Esquema general SFA (Elaboración propia)	36
Ilustración 21. Tipologías paneles solares (Solarfam, 2020)	37
Ilustración 22. Curva I-V y P-V panel solar (AutoSolar, s.f.a)	37
Ilustración 23. Curva I-V panel solar (Energética, 2011)	38
Ilustración 24. Curva I-V módulo en mal estado (Clever solar devices, 2020)	38
Ilustración 25. Ejemplo potencia máxima panel (AutoSolar, s.f.a).....	39
Ilustración 26. Representación DOD y SOC baterías (Cambio Energético, 2022).....	40
Ilustración 27. Ciclos de vida vs. Profundidad de descarga baterías AGM y ferfosfato (PowerTech, 2022)	40
Ilustración 28. Curva I-V panel con regulador PWM y MPPT (AutoSolar, s.f.a)	43
Ilustración 29. Evolución SFA (Fernández Fuentes, 2017).....	44
Ilustración 30. Esquema SFA 1ra Generación (1G-SFA) (Elaboración propia).....	45
Ilustración 31. Esquema 2G-SFA (Elaboración propia).....	46
Ilustración 32. Precio venta al público para 3 tipos de SFA con los mismos beneficios energéticos (Phadke et al, 2015).....	47
Ilustración 33. Esquema equipos SFA3G (Elaboración propia).....	47
Ilustración 34. Vida útil componentes 3G-SFA (Fernández Fuentes, 2017).....	48
Ilustración 35. Potencial eléctrico fotovoltaico global (World Bank Group, 2023).....	52
Ilustración 36. Irradiación directa normal (World Bank Group, 2023).....	53

Ilustración 37. Irradiación global horizontal (World Bank Group, 2023).....	53
Ilustración 38. Potencial Fotovoltaico Panamá (World Bank Group, 2023).....	54
Ilustración 39. Fosera Ceiling Lamp 100 (Fuente : Fosera).....	57
Ilustración 40. Esquema frigorífico Phocos FR230-B (Fuente: Phocos)	57
Ilustración 41. TV (Fuente: Zimpertec).....	58
Ilustración 42. Consumo horario demanda SIN frigorífico (Elaboración propia).....	59
Ilustración 43. Consumo por equipo demanda SIN frigorífico (Elaboración propia)....	59
Ilustración 44. Consumo horario demanda con frigorífico (Elaboración propia)	60
Ilustración 45. Consumo por equipo demanda con frigorífico (Elaboración propia).....	60
Ilustración 46. Península Valiente	61
Ilustración 47. Resultados PVGIS módulo 120Wp y batería de 25Ah (Fuente PVGIS) 68	
Ilustración 48. Gráfico E_d y E_I (Fuente PVGIS).....	69
Ilustración 49. Gráfico estado carga de la batería (Fuente PVGIS)	69
Ilustración 50. Resultados PVGIS módulo 240Wp y batería de 50Ah (Fuente PVGIS) 70	
Ilustración 51. Gráfico E_d y E_I (con frigorífico) (Fuente PVGIS).....	70
Ilustración 52. Gráfico estado carga de la batería (con frigorífico) (Fuente PVGIS)	71
Ilustración 50. Funcionamiento método PAYG (Elaboración propia)	75
Ilustración 51. Papel modelo de suministro en proceso de electrificación (Elaboración propia).....	77
Ilustración 52. Estructura entidad ejecutora proyectos (Ortiz Jara, 2019)	89
Ilustración 53. Mapa GIS Mashiki (Kushiyama & Matsuoka, 2019).....	90
Ilustración 54. Resultados REM demanda base (Ellman, 2009)	92
Ilustración 55. Resultados REM considerando un aumento de demanda (Ellman, 2009)	92
Ilustración 56. Resultados GEP Uganda (Fuente: GEP)	93
Ilustración 57. Factores que afectan la compra de una bomba de agua (Efficiency for Access, 2021)	98
Ilustración 58. Payback de bomba diésel versus bomba solar en Kenia (Lighting Global, 2019).....	99
Ilustración 59. Esquema diseño molino solar con batería (Efficiency for Access, 2020)	100
Ilustración 60. Esquema diseño molino solar sin batería (Efficiency for Access, 2020)	101
Ilustración 61. Análisis punto de equilibrio molino solar y diésel (Efficiency for Access, 2020).....	102
Ilustración 62. Estructura inversión (Elaboración propia)	106
Ilustración 63. Trayecto Ciudad de Panamá-David (Fuente: Google Maps)	108
Ilustración 64. Trayecto David-Península Valiente (Fuente: Google Maps)	109
Ilustración AI- 1. La energía asequible y limpia apoya todos los ODS (IRENA, 2017)	129
Ilustración AII- 1. Estructura hoja Excel (Elaboración propia).....	131
Ilustración AII- 2. Selección horas funcionamiento equipos (Elaboración propia)	139

Índice Tablas

Tabla 1. Definición niveles de acceso (ESMAP, 2015)	17
Tabla 2. Comparación luminaria (LED42, 2022).....	20
Tabla 3. Comparación características TV (Efficiency For Access Coalition, 2021a)....	22
Tabla 4. Tipos de refrigeradores de compresión (Efficiency For Access Coalition, 2021e).....	27
Tabla 5. Comparación refrigeradores compresión (Efficiency For Access Coalition, 2021e).....	28
Tabla 6. Ventajas e inconvenientes configuraciones (Elaboración propia).....	35
Tabla 7. Características baterías (Elaboración propia).....	41
Tabla 8. Consumo equipos seleccionados para dimensionamiento (Elaboración propia)	59
Tabla 9. Variaciones dimensionamiento demanda sin frigorífico (Elaboración propia)	66
Tabla 10. Variaciones dimensionamiento demanda con frigorífico (Elaboración propia)	66
Tabla 11. Selección paneles y baterías (Elaboración propia).....	66
Tabla 12. La calidad en el ciclo de vida de los SFA (Fuente: Julio Eisman).....	72
Tabla 13. Comparación modelos suministro (Elaboración propia).....	85
Tabla 14. Comparación molino diésel y solar (Efficiency for Access, 2020).....	101
Tabla 15. Precios materiales SFA3G (Elaboración propia)	106
Tabla 16. Costes mano de obra (Elaboración propia)	107
Tabla 17. Mano de obra instalación (Elaboración propia)	107
Tabla 18. Costes Transporte y Equipos (Elaboración propia).....	108
Tabla 19. Coste Transporte Ciudad de Panamá-David (Elaboración propia)	108
Tabla 20. Coste transporte a Península Valiente (Elaboración propia).....	109
Tabla 21. Costes unitarios de inversión (Elaboración propia).....	110
Tabla 22. Costes Fijos mensuales (Elaboración propia).....	111
Tabla 23. Actividades mantenimiento preventivo (Elaboración propia).....	112
Tabla 24. Costes Mantenimiento Preventivo por módulo instalado (Elaboración propia)	112
Tabla 25. Criterios mantenimiento correctivo (Elaboración propia).....	112
Tabla 26. Coste total mantenimiento correctivo (Elaboración propia)	113
Tabla 27. Coste comercial mano de obra (Elaboración propia)	113
Tabla 28. Coste comercial total (Elaboración propia).....	113
Tabla 29. Coste materiales recambio caja baterías (Elaboración propia).....	114
Tabla 30. Coste transporte y mano de obra recambio caja baterías (Elaboración propia)	114
Tabla 31. Total coste recambio caja baterías (Elaboración propia)	114
Tabla 32. Coste retiro y reinstalación (Elaboración propia).....	115
Tabla 33. Coste total retiro+reinstalación (Elaboración propia)	115
Tabla 34. Resumen costes (Elaboración propia)	115
Tabla 35. Cuotas mensuales (Elaboración propia)	116
Tabla 36. Tasa indisponibilidad de equipos (Elaboración propia)	116
Tabla 37. Ingresos anuales (Elaboración propia)	116
Tabla 38. Resumen ingresos y costes normalizados (Elaboración propia)	117
Tabla AII- 1. Catálogo de iluminación (Elaboración propia).....	132
Tabla AII- 2. Catálogo de refrigeradores Parte 1 (Elaboración propia)	133

Tabla AII- 3. Catálogo de refrigeradores Parte 2 (Elaboración propia)	134
Tabla AII- 4. Catálogo Televisión Parte 1 (Elaboración propia)	135
Tabla AII- 5. Catálogo Televisión Parte 2 (Elaboración propia)	136
Tabla AII- 6. Catálogo Ventiladores Parte 1 (Elaboración propia).....	137
Tabla AII- 7. Catálogo Ventiladores Parte 2 (Elaboración propia).....	138
Tabla AII- 8. Resultados selección equipos demanda con frigorífico (Elaboración propia).....	140
Tabla AII- 9. Resultados consumo equipos demanda con frigorífico 1 (Elaboración propia).....	140
Tabla AII- 10. Resultados consumo equipos demanda con frigorífico 2 (Elaboración propia).....	141
Tabla AII- 11. Resultados Consumo total demanda con frigorífico (Elaboración propia)	141

Listado Acrónimos

ALC	América Latina y Caribe
BID	Banco Internacional de Desarrollo
CA	Corriente Alterna
CAU	Centros de Atención al Usuario
CC	Corriente Continua
CEF	Comités de Electrificación Fotovoltaica
ESMAP	Acrónimo en inglés de Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético
IP	Imán Permanente
IEC	Acrónimo en inglés de Comisión Electrotécnica Internacional
I-V	Intensidad-Voltaje
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MR	Minirredes
MTF	Multi-Tier Framework
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenibles
O&M	Operación y mantenimiento
PAYG	Acrónimo en sus siglas en inglés de Pay-As-You-Go (tecnología de pre-pago que bloquea la disponibilidad del uso de energía de un SFA si no se ha abonado la tarifa o cuota correspondiente)
SFA	Sistemas Fotovoltaicos Aislados
SIN	Sistema Interconectado Nacional
TIC	Tecnologías de la información y comunicación

1. Problemática del acceso universal a la energía

1.1. Cuantificación

En 2021, un total de 675 millones de personas en todo el mundo no tuvieron acceso a la electricidad. En 2010 esta cifra era de 1.100 millones de personas, lo que supone una gran mejora. Sin embargo, desde 2019 las tasas de crecimiento de la electrificación a nivel mundial de han ralentizado. Esta ralentización se debe al reto que supone llegar a aquellos más difíciles de alcanzar y a las consecuencias derivadas de la crisis de la Covid-19 (IEA et al, 2023).

Territorialmente, la región de África subsahariana concentra la mayor parte de las personas que viven sin acceso a la electricidad, en concreto el 80% en 2021 (IEA et al, 2023). Si se mantienen las tendencias actuales, para 2030 habrá 660 millones de personas sin servicio (IRENA, 2022). Como se puede observar en la siguiente imagen, hay muchas regiones en las que la tasa de electrificación es cercana al 100%, pero se requieren todavía esfuerzos para poder llegar a toda la población:

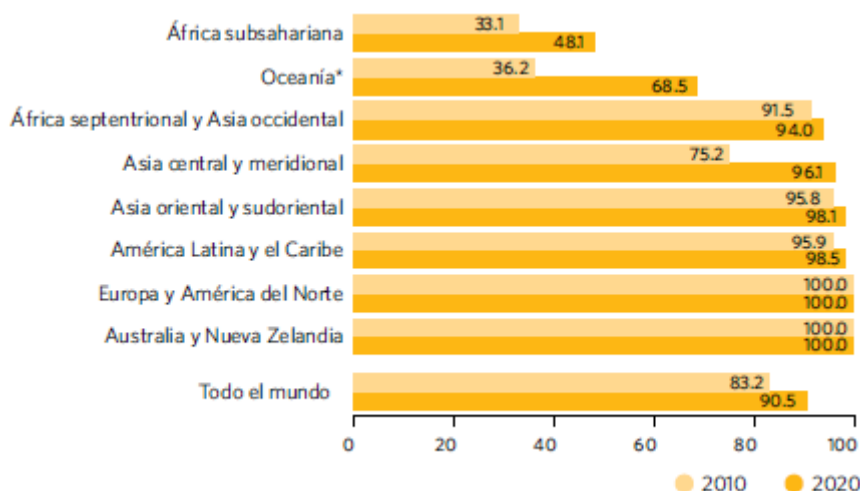


Ilustración 1. Porcentaje de población con acceso a la electricidad (ONU, 2022a)

Las políticas para el acceso universal a la electricidad deben demostrar un compromiso político y maximizar los beneficios socioeconómicos del acceso, orientando sus esfuerzos hacia los países con tasas de electrificación bajas. Esta recomendación se mantiene firmemente a lo largo del informe desarrollado por la Agencia Internacional de la Energía (junto con otras organizaciones) en 2023 (IEA et al, 2023).

Cabe destacar que, en 2019, las corrientes financieras internacionales hacia países en desarrollo para fuentes renovables disminuyeron por segundo año consecutivo. Concretamente, en 2019 la cifra fue de 10.900 millones de dólares mientras que en 2018 fue de 14.300 millones y en 2017 de 24.700 millones. A pesar de ello, el consumo total de energía renovable aumentó una cuarta parte entre 2010 y 2019, aunque en este último año la proporción de fuentes renovables en el consumo total de energía final fue del 17,7% (ONU, 2022a).

Para poder alcanzar el objetivo mundial de electrificación total en 2030 es necesario que los avances en eficiencia energética se aceleren, pasando de una tasa actual de mejora

anual de la intensidad energética del 1,9% a un 3,2%. La meta es alcanzable, pero únicamente con una inversión importante en mejoras rentables de la eficiencia energética. Hasta el momento, solamente Asia oriental y sudoriental ha alcanzado la meta de eficiencia energética con una tasa media anual del 2,7% en el período de 2010 a 2019 (ONU, 2022a).

Además, muchos territorios ya electrificados se enfrentan también a problemas de fiabilidad, que suponen una amenaza para los servicios esenciales. En la región de ALC, por ejemplo, a lo largo de 2017 se experimentaron 6,3 interrupciones no programadas con una duración media de 12,8 horas. Estas interrupciones tienen un efecto devastador en las economías locales, principalmente en aquellas que dependen del turismo (ARE & IDB, 2021).

Cabe destacar que un correcto análisis acerca del acceso mundial a la electricidad no puede realizarse considerando únicamente valores cuantitativos. Es por ello, que en las últimas décadas se han desarrollado diversos índices cuyo objetivo es medir el acceso a la energía mediante una perspectiva multidimensional. Un claro ejemplo de ello es el conocido Multi-Tier Framework, desarrollado por el Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de la Energía (ESMAP) del Banco Mundial. El MTF evalúa el acceso de un país a la electricidad en función de los siguientes atributos: capacidad, duración, confiabilidad, calidad, asequibilidad, legalidad y salud y seguridad. Basándose en estos atributos se definen niveles del cero al cinco y se estudian en diferentes contextos (urbano contra rural, empresas...) (ESMAP, 2015).

Además, actualmente hay 2.400 millones de personas en el mundo que siguen usando sistemas de cocina ineficientes y contaminantes. El uso de electricidad para cocinar es muy limitado en países de ingresos bajos y medios, y aporta grandes beneficios como un aire doméstico más limpio y respirable, menores riesgos de incendios o de intoxicación por gases o menores costes de cocción. Sin embargo, el presente trabajo no tratará el acceso a la energía para calentar y cocinar, solo se mencionará en cuanto a posible uso consumidor de electricidad (ONU, 2022a).

1.2. Estado de la cuestión

En la actualidad, el principal cuello de botella que impide que la electricidad sea accesible para todas las personas es la distribución. Esto se debe a que históricamente se ha invertido muy poco capital en ello, generando situaciones como la de la región de África Subsahariana, donde el flujo de capital privado destinado a transmisión y distribución es prácticamente cero. Consecuentemente, este hecho supone grandes retos de viabilidad que impiden la extensión de la electricidad mediante red. La falta de un adecuado marco regulador que abarque la actividad de distribución tiene también un impacto en las soluciones fuera de red, y el reciente crecimiento de minirredes y sistemas aislados se ha producido en gran medida en silos. Por consiguiente, para conseguir una electrificación universal en 2030, se deben definir nuevos modelos de negocio para la distribución que integren una visión a largo plazo (Pérez-Arriaga et al, 2022).

Sumado al problema en la distribución, otro reto al que deben hacer frente muchas regiones con bajos porcentajes de electrificación es el que supone contar con personas desplazadas o que viven en asentamientos irregulares. A final del 2021, el número total de desplazados por la fuerza en el mundo ascendía a 89,3 millones. Entre ellos, 27,1

millones de refugiados. Estas cifras son considerablemente superiores a las de 2010, cuando la cifra total de desplazados fue de 41 millones. Se considera **refugiado** a cualquier persona que, debido a fundados temores de ser perseguido por motivos de raza, religión, nacionalidad, pertenencia a determinado grupo social u opiniones políticas, se encuentre fuera del país de su nacionalidad y no pueda o, a causa de dichos temores, no quiera acogerse a la protección de tal país; o que careciendo de nacionalidad y hallándose fuera del país donde antes tuviera su residencia no pueda, o no quiera, regresar a él. Un 69% de todos los refugiados desplazados en el extranjero procedían únicamente de cinco países (6,8 millones de República Árabe Siria, 4,6 millones de Venezuela, 2,7 millones de Afganistán, 2,4 millones de Sudán del Sur y 1,2 millones de Myanmar) (ACNUR, 2021). Sin embargo, cabe destacar que la cifra de desplazados a nivel mundial ha crecido en el último año debido a la guerra en Ucrania y otras emergencias, superando los 100 millones de personas en junio del 2022 (ACNUR, 2022). Aparte de los refugiados, cada vez hay más desplazados por razones ambientales o económicas.

Las zonas rurales aisladas presentan una dificultad adicional de financiación por el alto costo de suministro – inversión y operación y mantenimiento – a clientes dispersos y con bajo consumo, especialmente si están lejos del SIN. Existen tres modos de electrificación: extensión de red, minirredes y sistemas aislados, que se utilizan según sea más apropiado para cada territorio.

La **extensión de red** es el modo tradicional de electrificación, que en general presenta un coste más bajo que el resto de las alternativas. Este modo de electrificación se convierte en un desafío cuando (Ortiz et al, 2020):

- Hay largas distancias hasta comunidades remotas y de baja densidad de población.
- La calidad de la oferta del servicio de red es baja, lo que resulta en frecuentes cortes de energía y reducciones de carga.
- Las tarifas aplicables a los consumidores finales son bajas, motivo por el que los modelos de negocio de los servicios públicos se ven afectados.

Por estos motivos, nace la necesidad de emplear minirredes o sistemas aislados con una planificación de mínimo costo y modelos de gestión eficientes.

Las **minirredes** son redes localizadas que en general no poseen la infraestructura necesaria para transmitir electricidad más allá de su área de servicio. En general, proporcionan electricidad a un coste superior al de un sistema de red principal de transmisión y distribución. Suelen estar basadas en tecnologías de generación modulares como solar fotovoltaica, turbinas eólicas, energía hidroeléctrica a pequeña escala y generadores diésel. Debido a la inversión inicial que requieren, necesitan un cierto umbral de demanda para justificarla. Además, deben poder ampliarse en función del aumento de la demanda, y, en última instancia, poder conectarse al SIN.

Los **sistemas fotovoltaicos aislados** (SFA) pueden construirse a cualquier escala para ajustarse al servicio de uso final. En general, pueden ampliarse a medida que crece la demanda de energía. Su coste inicial puede ser un obstáculo crítico, por lo que la disponibilidad de financiación para su despliegue es un factor importante (IEA, 2020).

Además, el modo de electrificación mediante SFA permite evitar el elevado coste marginal de extender la red a zonas remotas y poco pobladas, así como acelerar el proceso de un acceso universal (Cabraal et al, 2021). De este modo, las minirredes y los sistemas

domiciliarios se están convirtiendo en la forma más eficiente de llevar el pleno acceso a las zonas remotas en un plazo de tiempo corto.

Concretamente, se estima que, bajo el escenario de conseguir un acceso universal a la energía en 2030, un 42% de las nuevas conexiones se realizarán mediante SFA y un 30% mediante minirredes. De este modo, la extensión de red representaría tan solo el 28% de los nuevos accesos a la electricidad, confirmando la existencia de un marco regulatorio y político muy favorable para los sistemas fuera de red (Blechinger et al, 2019).

En referencia a su coste, se considera deseable que la extensión de red requiere una inversión inicial de unos 2.500 USD por hogar, excluyendo la inversión para la central de generación. La inversión necesaria para las minirredes dependerá de diversos factores³, pero se estima que se encontrará entre los 1.000-6.000 USD por hogar, incluyendo la generación, almacenamiento y distribución. Por último, la inversión requerida para los SFA dependerá de su dimensionamiento y se encontrará entre los 300-1.300 USD por SFA y hogar (Blechinger et al, 2019).

Por otro lado, para conseguir alcanzar la meta 7.1 del ODS No.7⁴, se requiere, además de una alta inversión económica, considerar otros aspectos como la oposición al desarrollo de proyectos por parte de ciertas comunidades o el aumento del nivel de endeudamiento de algunos países debido a la pandemia del Covid-19. Estos aspectos pueden provocar el retraso en el cumplimiento del ODS o que las estimaciones económicas aumenten (Echeverri, 2021). Además, la pandemia del Covid-19 ha provocado que se hayan eliminado cuatro años de progreso contra la pobreza. El aumento de la inflación y la guerra en Ucrania están provocando una grave contracción económica, ralentizando el progreso de poner fin a la pobreza en todas sus formas. Se estima que en 2022 hay alrededor de 657-676 millones de personas que viven en pobreza extrema. En 2020, la tasa de pobreza laboral aumentó por primera vez en dos décadas, elevando la cifra de un 6,7% en 2019 a un 7,2% en 2020 (ONU, 2022a).

1.2.1. Beneficios e impactos socioeconómicos de la electrificación

En la medida que el acceso a la electricidad tiende al 100%, el crecimiento económico se impulsa en consecuencia. Esto permite garantizar una equidad en términos sociales y mayores oportunidades de desarrollo (Echeverri, 2021). Cabe destacar que las condiciones previas de las zonas electrificadas juegan un papel clave en el número y la magnitud de los impactos esperados. Las áreas más desarrolladas económicamente son las que más pueden llegar a beneficiarse, debido a que poseen un mejor acceso a nuevos mercados o a grandes mercados locales o a una industria sólida preexistente. Además del acceso, las empresas necesitan un servicio fiable y de calidad y condiciones que lo faciliten, por lo que es necesario promover estas condiciones en paralelo con los programas de electrificación (Pueyo, 2013).

Entre los principales beneficios derivados de la electrificación se pueden destacar (Cabraal et al, 2021):

- Mejora de las condiciones sanitarias y de la seguridad. Se evitan los riesgos que derivan del uso de velas o lámparas de queroseno.

³ Entre ellos el nivel de energía al que se desee acceder, elaborado en el *Capítulo 2 Niveles de Acceso* del presente documento.

⁴ La meta 7.1 establece garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.

- Aumento del tiempo de trabajo o de estudio y de utilización de herramientas que aumentan la productividad. En general, los efectos en los resultados en educación y el mayor empleo causan un incremento en los ingresos del 30% en promedio (Jimenez, 2017).
- Mejora de la calidad de vida de mujeres y niñas. Específicamente, el impacto se puede agrupar en cuatro áreas principales. En primer lugar, permite reducir los tiempos y la carga de trabajo que las mujeres dedican diariamente a las tareas de sobrevivencia como recolección de madera o agua, pudiendo utilizar este tiempo para otros usos productivos. Este mismo hecho mejora su salud, reduciendo las horas de trabajo pesado. Consecuentemente, el tener más tiempo libre permite mejorar sus capacidades y educación, teniendo un impacto a largo plazo en su carrera profesional. Por último, el hecho de poder optar a cambiar su poder adquisitivo les permite ganar influencia en los hogares, lo que puede ayudar a cambiar los roles tradicionales de la mujer (Pérez-Arriaga & Eisman, 2020).
- Los servicios públicos como escuelas, dispensarios médicos o centros públicos alcanzan niveles deseables de calidad y eficacia.

Además de estos beneficios, cabe destacar que concretamente las soluciones aisladas que proporcionan energía renovable tienen un gran potencial para impulsar la agricultura y los sectores económicos alternativos, y de este modo ayudar a las comunidades para que puedan diversificar sus actividades económicas. Además, se impulsa la creación de trabajo local (Guzmán et al, 2021).

Concretamente, un reciente estudio de GOGLA con el Banco Mundial dedicado exclusivamente a los sistemas domiciliarios fotovoltaicos revela las siguientes conclusiones (GOGLA, 2020):

- Aproximadamente 420 millones de personas en el mundo usan actualmente productos solares aislados de la red, de los cuales 231 millones tienen nivel 1 o superior. Este sector emplea el equivalente a 1,3 millones de trabajos a tiempo completo.
- Ahorros en los gastos en energía del hogar: la motivación para adquirir un SFA debe ir más allá de los ahorros en queroseno o velas y basarse en las oportunidades que el SFA ofrece de realizar actividades con valor económico y mejorar la calidad de vida.
- Aumento de la actividad económica: se estima que entre el 19% y el 34% de los hogares han aumentado su actividad económica en tareas realizadas en el hogar, dado que los SFA permiten la creación de nuevas actividades o mejorar las existentes.
- Salud y seguridad: los SFA proporcionan un suministro eléctrico fiable de iluminación necesario para el funcionamiento de aparatos, refrigeración de vacunas y comunicaciones.
- Educación: el 69% de las escuelas en África sub-Sahariana y el 49% de las del sur de Asia no tienen acceso a la electricidad, con las consecuencias que ello implica.
- Acceso a la televisión y radio: estos servicios proporcionan acceso a información, reduciendo el aislamiento social y mejorando las habilidades de leer, hablar y escribir.
- Ventiladores y frigoríficos: mejoran el confort en el hogar y la seguridad de los alimentos.

- Bombas de riego y molinos solares: aumentan la producción de las granjas y permiten evitar el transporte de del producto agrícola a los lugares donde se encuentran instalados molinos que funcionan con diésel.

1.3. Principios para la electrificación universal

Tal y como se ha mencionado previamente, el acceso universal a la electricidad es en muchas ocasiones obstaculizado por los fallos que tienen lugar en la distribución. Los principios para una electrificación universal que se proponen a continuación están fundamentados en el enfoque que el Universal Energy Access Lab conjunto del MIT e IIT-Comillas propone como “integrated distribution framework, IDF”.⁵ El Marco Integrado de Distribución se construye sobre la existencia de una entidad que es responsable de la actividad de distribución en un territorio determinado, con el objetivo de proporcionar servicio eléctrico universal por modo del medio más adecuado. La motivación tras la creación del IDF ha sido la convicción de que es fundamental seguir estos cuatro principios básicos de la electrificación:

- A) Acceso universal: implica no dejar a nadie atrás, un suministro permanente y la existencia de una entidad con la responsabilidad de proporcionar este servicio en un territorio determinado.
- B) Un plan eficiente que combine los tres modos de electrificación (extensión de red, minirredes y sistemas aislados); lo que requiere una planificación integrada en el ámbito de la distribución para todo el territorio considerado, contemplando todos los tipos de consumidores y medios de suministro.
- C) Que el modelo de negocio que se adopte sea viable económicamente, lo que puede requerir un contrato de concesión que proporcione seguridad jurídica, la participación de inversores privados y la posible presencia de subsidios que permitan cubrir el déficit inevitablemente asociado a la distribución en zonas rurales aisladas.
- D) Un enfoque centrado en promover el desarrollo económico y social.

1.4. Electrificar la última milla con Sistemas Fotovoltaicos Aislados

En algunos países conviven unas tasas de cobertura eléctrica superiores al 80% y al 90% con población que por sus circunstancias específicas no disponen de acceso a la electricidad. Estas comunidades, que en algunos casos se han denominado “comunidades rurales aisladas”, se caracterizan por (RAI, 2011):

- Aislamiento geográfico, hecho que dificulta el acceso a la energía mediante infraestructuras viales.
- Características socioeconómicas comunes, determinadas por niveles bajos de ingresos. Esto conlleva a que no tengan los recursos económicos necesarios para poner en práctica los avances tecnológicos que serían necesarios para su bienestar y desarrollo.
- Exclusión o desamparo de las autoridades responsables de la provisión de los servicios.

⁵ En el informe “Global Commission to End Energy Poverty. Inception Report” se encuentra la justificación y el plan de aplicación del IDF. <https://www.endenergypoverty.org/report>

- Carencia de infraestructuras de suministro de agua, saneamiento, energía y telecomunicaciones, junto con un bajo nivel de asistencia de salud, educación y cultura.

En la Ilustración 2, se puede observar como las comarcas indígenas de Panamá tienen la menor tasa de electrificación y los mayores índices de pobreza multidimensional, frente al resto de provincias panameñas.

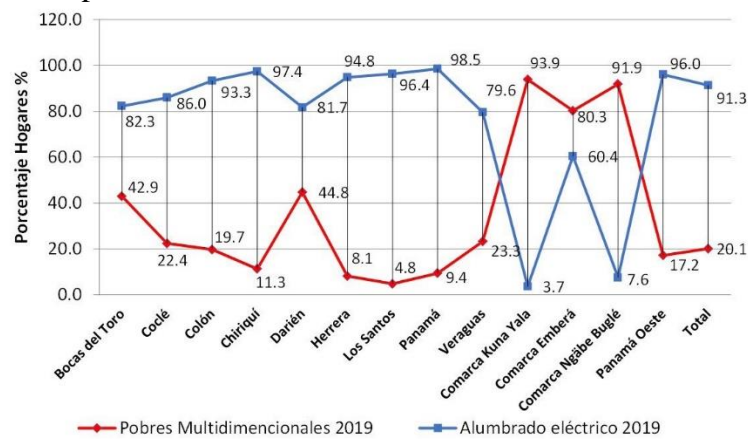


Ilustración 2. Gráfico cobertura/pobreza Panamá 2019 (República de Panamá et al, 2022)

Las circunstancias de estas comunidades encarecen la inversión y el mantenimiento requeridos para las infraestructuras, suponiendo grandes retos a la hora de conseguir una cobertura universal.

Al conjunto de comunidades rurales aisladas de países con elevada tasa de electrificación lo hemos denominado la “última milla” por ser el reducto a electrificar para conseguir el acceso universal a la electricidad.

En general, el modo convencional de electrificación de extensión de redes no es viable para estos casos. Por ello, se requiere de métodos de electrificación aislada como minirredes para poblaciones con viviendas agrupadas o SFA para poblaciones dispersas⁶.

Parte de estos colectivos se concentran en la región de Iberoamérica, con países como Argentina, Brasil, Colombia, México o Perú, que debido a su potencia económica no se pueden permitir desatender a parte de su población. Actualmente, en esta región se tiene una cobertura de cerca del 97%, lo que implica que haya cerca de 18 millones de habitantes que todavía no cuentan con acceso a la energía eléctrica. Además, se estima que en esta región hay cerca de 65 millones de personas desatendidas, pese a estar cubiertos por la red de electricidad nacional (Guzmán et al, 2021).

Según se avanza en la electrificación, los costos unitarios de electrificar los hogares van aumentando y los ritmos disminuyen. Por ejemplo, hay países como Venezuela o México

⁶ De acuerdo con la metodología actualmente utilizada en Colombia para preparar el Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica PIEC 2019-2023, publicado por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), en aquellas zonas ubicadas lejos del SIN, en donde el número de viviendas sin servicio es mayor a 25, se debe realizar la conexión de esas viviendas mediante minirredes. De otra parte, en los lugares en los que el número es menor a 25, el usuario ha de ser atendido mediante un SFA.

que están próximos al 99% de cobertura, pero no consiguen llegar al 1% final (SEGIB, 2021).

En la Ilustración 3, puede observarse cómo va disminuyendo el avance en la cobertura eléctrica a medida que esta se incrementa.

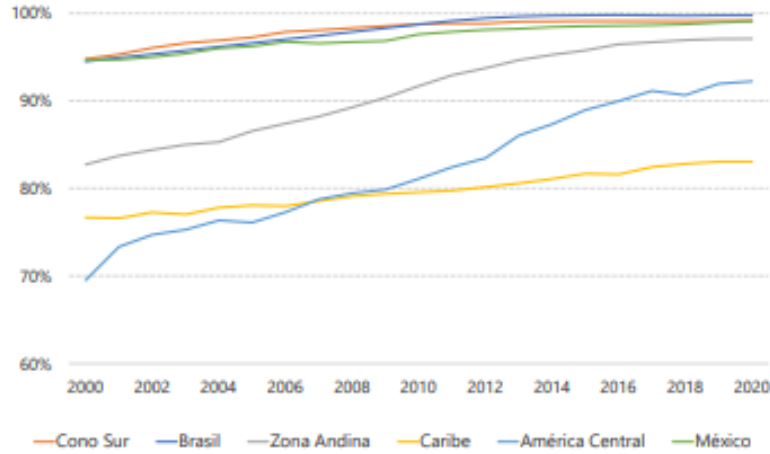


Ilustración 3. Tasa de electrificación ALC por subregiones (OLADE et al, 2021)

Concretamente, las zonas rurales de la región de ALC concentran el 90% de las personas sin acceso a electricidad. Para estas zonas donde las redes nacionales no llegan, se estima que mediante **sistemas aislados** y minirredes se lograría la mejor cobertura del 40% de esta demanda (Guzmán et al, 2021). Mientras que la gestión de redes y minirredes dispone de procedimientos internacionales muy depurados a lo largo de más de 100 años, no ocurre lo mismo con la gestión de la electrificación con SFA cuyo uso se ha extendido en los últimos años mediante diferentes modelos de servicio.

Este trabajo se centra en la electrificación de la última milla mediante sistemas fotovoltaicos aislados. Los siguientes capítulos analizarán aspectos tanto técnicos como económicos relacionados con la viabilidad de ofrecer el servicio eléctrico a las comunidades en la última milla mediante SFA.

2. Niveles de acceso

2.1. Descripción de los niveles

El acceso a la energía eléctrica genera un gran impacto en la vida de una persona, que depende enormemente de las características de este, y no puede resumirse en un simple estado binario: tener acceso o no tenerlo. Para tener un impacto real en los hogares, el suministro de energía eléctrica debe ser adecuado en cantidad, disponible cuando se le necesita, con un producto de buena calidad, asequible, legal, idóneo para ser utilizado, saludable, y seguro.

Por este motivo, antes de dimensionar los sistemas, es necesario estudiar qué se considera un nivel adecuado de acceso a la energía y qué servicio debe poder ofrecer este acceso.

Actualmente, el método para cuantificar el nivel el acceso a la energía eléctrica es el conocido como “marco de niveles múltiples” (Multi-Tier Framework, MTF). Este método fue lanzado en 2015 por el ESMAP dentro del contexto de la iniciativa Energía Sostenible para Todos (SE4ALL).

En el MTF el acceso a la energía se mide en función de la combinación de siete atributos y se representa con seis niveles diferentes, desde el nivel 0 (sin acceso) hasta el nivel 5 (el nivel de acceso más alto).

El MTF comienza con el nivel más bajo de energía (nivel 1), que se refiere a un acceso limitado a pequeñas cantidades de electricidad durante unas pocas horas al día para un punto de iluminación y carga de un teléfono móvil. Este nivel de acceso puede ser proporcionado por cualquier tecnología, incluso un pequeño sistema de iluminación solar a veces denominado sistema **pico** fotovoltaico. Por el contrario, los niveles de acceso más altos requieren de la red eléctrica nacional o minirredes de elevada potencia y fiabilidad. Estos niveles se definen por una mayor capacidad y duración de suministro 24/7. Sin embargo, además de estos dos atributos, en estos niveles de acceso se tienen en cuenta otros atributos como la confiabilidad, la calidad, la asequibilidad, la legalidad y la seguridad.

Cada uno de los siete atributos se mide por separado, y se considera que el nivel general de acceso a la electricidad para un hogar es el más bajo de todos ellos, es decir, si un hogar ha alcanzado el nivel 3 en todos los atributos excepto en uno, en el que se encuentra en el nivel 2, el nivel general de acceso de ese hogar será el 3.

Los diferentes niveles junto con sus correspondientes atributos se pueden observar en la siguiente tabla:

		TIER 0	TIER 1	TIER 2	TIER 3	TIER 4	TIER 5
1. Peak Capacity	Power capacity ratings ²⁸ (in W or daily Wh)		Min 3 W	Min 50 W	Min 200 W	Min 800 W	Min 2 kW
	OR Services		Min 12 Wh	Min 200 Wh	Min 1.0 kWh	Min 3.4 kWh	Min 8.2 kWh
2. Availability (Duration)	Hours per day		Min 4 hrs	Min 4 hrs	Min 8 hrs	Min 16 hrs	Min 23 hrs
	Hours per evening		Min 1 hr	Min 2 hrs	Min 3 hrs	Min 4 hrs	Min 4 hrs
3. Reliability						Max 14 disruptions per week	Max 3 disruptions per week of total duration <2 hrs
4. Quality						Voltage problems do not affect the use of desired appliances	
5. Affordability						Cost of a standard consumption package of 365 kWh/year < 5% of household income	
6. Legality						Bill is paid to the utility, pre-paid card seller, or authorized representative	
7. Health & Safety						Absence of past accidents and perception of high risk in the future	

Tabla 1. Definición niveles de acceso (ESMAP, 2015)

Dadas estas prestaciones, los equipos que pueden conectarse en función de cada uno de los niveles dependerá de la eficiencia de estos. Sin embargo, puede representarse de forma aproximada con la siguiente imagen:



Ilustración 4. Equipos disponibles en función nivel MTF (Bhatia & Angelou, 2015)

Nivel 0: no hay disponibilidad de electricidad y por consiguiente los hogares deben hacer uso de energéticos alternativos como velas o lámparas de keroseno.

Nivel 1: capacidad suficiente para una luz puntual más la carga de teléfonos móviles y radio.

Nivel 2: capacidad suficiente para nivel 1 más luz general, TV en color y ventilador.

Nivel 3: capacidad suficiente para nivel 2 más frigorífico y otros electrodomésticos de pequeña-media potencia.

Nivel 4: capacidad suficiente para nivel 3 más electrodomésticos de alta potencia como lavadoras, secador de pelo o microondas.

Nivel 5: capacidad suficiente para alimentar equipos de muy elevada potencia como aires acondicionados. Esto se consigue mediante la conexión a la red eléctrica nacional.

En la clasificación en niveles, el método utiliza valores numéricos de potencia (W, Wh) y de energía (Wh, kWh) que cada nivel puede suministrar y hace referencia a los servicios que la electricidad proporciona. Sin embargo, debido a la evolución en las mejoras de eficiencia y prestaciones de los equipos, los valores numéricos se quedan obsoletos y, por consiguiente, es más adecuado definir los niveles a partir de los servicios que la electricidad proporciona (Bhatia & Angelou, 2015).

2.2. Nivel de acceso básico

Una vez definidos los diferentes niveles de acceso a la energía, se debe debatir qué nivel puede considerarse como básico. El debate se limitará al consumo de usos residenciales de la electricidad, dado que los usos productivos de la electricidad se estudiarán en el *Capítulo 6. Usos Productivos*.

Una vez determinado el nivel básico, se podrá proceder al dimensionado de los sistemas fotovoltaicos, los cuáles deben permitir alcanzar ese nivel.

La IEA, Agencia Internacional de la Energía, define el acceso a la energía como "un hogar que dispone de un acceso fiable y asequible tanto a instalaciones limpias para cocinar como a electricidad, lo que es suficiente para suministrar un paquete básico de servicios energéticos inicialmente, pero que puede crecer con el tiempo hasta alcanzar la media regional".

Este mismo organismo define un paquete básico de servicios energéticos como un paquete que contiene como mínimo, varias bombillas, carga de teléfono, una radio y, potencialmente, un ventilador o un televisor, con un nivel de servicio capaz de crecer con el tiempo. Según sus estimaciones, un hogar medio que ha obtenido acceso tiene electricidad suficiente para alimentar:

- Cuatro bombillas que funcionan cinco horas al día
- Un frigorífico
- Un ventilador que funciona seis horas al día
- Un cargador de móvil
- Un televisor que funciona cuatro horas al día

Según la IEA, esto equivale a un consumo anual de electricidad de 1.250 kWh/hogar con electrodomésticos estándar, y 420 kWh con electrodomésticos eficientes. El uso de equipos eficientes se estudiará posteriormente en este mismo capítulo (IEA 2020).

Se puede establecer que los niveles inferiores de acceso del MTF (el nivel 0 y el 1), no permiten acceder a los servicios considerados previamente como básicos. Por este motivo, debería aspirarse por lo menos al nivel 2. Sin embargo, teniendo en cuenta las observaciones planteadas por la IEA, el nivel mínimo que permite satisfacer un nivel de acceso básico es el 3.

La organización Energía Sostenible para Todos (SE4ALL) afirma también que el nivel 3 es el nivel de consumo doméstico de electricidad necesario para satisfacer las necesidades esenciales y alcanzar un nivel de vida digno (SE4All 2020).

Del mismo modo, la Mesa de Acceso Universal a la Energía establece que un nivel adecuado de acceso a la energía debe permitir al menos:

- Iluminación: una iluminación media en los hogares de 300 lux durante un mínimo de 4 horas nocturnas.
- Dispositivos electrónicos: radio, televisión, ordenadores y teléfonos móviles deben poder ser utilizados en los hogares.
- Conservación de alimentos: se debe disponer de algún dispositivo que permita prolongar la vida de los alimentos perecederos al menos un 50% más de lo que perdurarían en condiciones ambiente.

Este organismo considera que se debe aspirar a un nivel de acceso según un enfoque de derechos humanos, que considere integralmente los usos de la energía necesarios para “las condiciones que le permiten a la persona su realización” (MAUE, 2015).

No obstante, tal y como se ha comentado previamente, la importancia no reside en el nivel de potencia suministrado, si no en el nivel de servicio. El nivel 3 puede ser actualmente el que proporcione la potencia necesaria para alimentar el conjunto de equipos que se considera que ofrecen un servicio básico, pero, el aumento de la eficiencia de los equipos puede hacer que la potencia suministrada por el nivel 2 sea suficiente. En el siguiente apartado se analiza la eficiencia de los equipos consumidores.

2.3. Equipos consumidores eficientes

La necesidad de seleccionar equipos que sean lo más eficientes posibles y que, por consiguiente, permitan ofrecer el mayor nivel de servicio para una potencia dada, abre el debate acerca de si estos equipos deben funcionar en CC o CA.

Tal y como se ve en el *Capítulo 3. SFA*, la mayoría de las electrificaciones con SFA se hacen en CC. Esto se debe a que tanto los circuitos electrónicos, como los paneles solares y las baterías que forman parte del SFA funcionan con CC.

Sin embargo, la mayoría de los electrodomésticos que se utilizan en los sistemas conectados a red requieren de CA (para su uso se requiere de un inversor que transforme la CC de los paneles y baterías en CA, tal y como se verá en el *Capítulo 3. SFA*). Pese a la posibilidad de disponer en el mercado de más equipos de CA que de CC, esta ventaja se debilita cuando estos equipos pueden ser inadecuados para los SFA por su baja

eficiencia energética o excesiva potencia demandada. Cabe destacar que cada vez se dispone de más equipos de CC, que además presentan prestaciones más eficientes.

Resumiendo, los equipos que funcionan en CA pueden presentar una eficiencia menor, un consumo mayor y afectar negativamente a las prestaciones del SFA. Además, los inversores tienen un rendimiento bajo debido a que sus pérdidas técnicas de energía se sitúan entre el 5 y el 15%, hecho que aumenta el coste por mayor dimensionamiento del panel solar y la batería. También puede ser una barrera para la escalabilidad al tener que sustituirlo al aumentar la demanda.

Por consiguiente, los dispositivos que funcionan en CC suelen ser más adecuados en el uso de sistemas aislados. La disponibilidad en el mercado de estos equipos con características eficientes, de un precio asumible, de bajo peso y alta calidad, puede facilitar la viabilidad y asequibilidad de los sistemas solares aislados para conseguir una electrificación universal.

El uso de equipos que no sean eficientes implica además que los sistemas fotovoltaicos deban estar equipados con una batería o un panel de mayor capacidad. Por consiguiente, los electrodomésticos de alto rendimiento permiten reducir los costes de electrificación y la posibilidad de utilizar más aparatos durante más tiempo.

A continuación, se estudiarán algunas características técnicas de las aplicaciones más demandadas en hogares alimentados por SFAs.

ILUMINACIÓN

La tecnología LED se presenta como la más eficiente para la iluminación con sistemas fuera de red. Es la que aporta mayor iluminación para un mismo nivel de consumo. La siguiente tabla muestra una comparación de consumos para distintas luminarias que aportan la misma iluminación, sin olvidar que se sigue progresando en la eficiencia lumínica (lúmenes por watio) de los focos led:

Incandescente	Halógeno	Fluorescente	LED	Lúmenes
10W			1W	80-90 ⁷
50W	29W	13W	7W	560-630
100W	49W	24W	12W	950-1080

Tabla 2. Comparación luminaria (LED42, 2022)

Tal y como se puede observar, para una misma potencia lumínica, la iluminación LED requiere de un sistema fotovoltaico de menor potencia. La necesidad de un consumo de potencia u otro y del número de focos dependerá del espacio que se desee iluminar.

La iluminación es, en general, una de las necesidades más básicas de los habitantes de las comunidades rurales aisladas. Es por ello por lo que existen sistemas más simples que los SFAs que permiten obtener este servicio. Se suelen denominar sistemas picofotovoltaicos y su potencia suele ser inferior a 10W. En el informe Tendencias del mercado Off-Grid 2022 (Lighting Global, 2022), se presentan dos tipos:

⁷ Actualmente existen en el mercado focos con una eficiencia lumínica de 150 lúmenes por watio.

- Linternas solares: normalmente contienen una luz LED y un panel solar integrado de 0,5-3Wp, con una batería interna recargable. Algunos modelos incluyen cargador USB para teléfonos móviles.
- Sistemas de iluminación múltiple: incluyen hasta tres o cuatro luces LED con un panel solar integrado de hasta 10Wp, y una batería recargable. La mayoría de los modelos incluyen cargador USB para teléfonos móviles. Más del 83% de los sistemas de iluminación múltiple vendidos por GOGLA entre los años 2019 y 2021 se categorizan como nivel 1, es decir, permiten que un hogar alcance completamente este nivel.

La evolución del precio de estos sistemas se representa en la siguiente imagen:

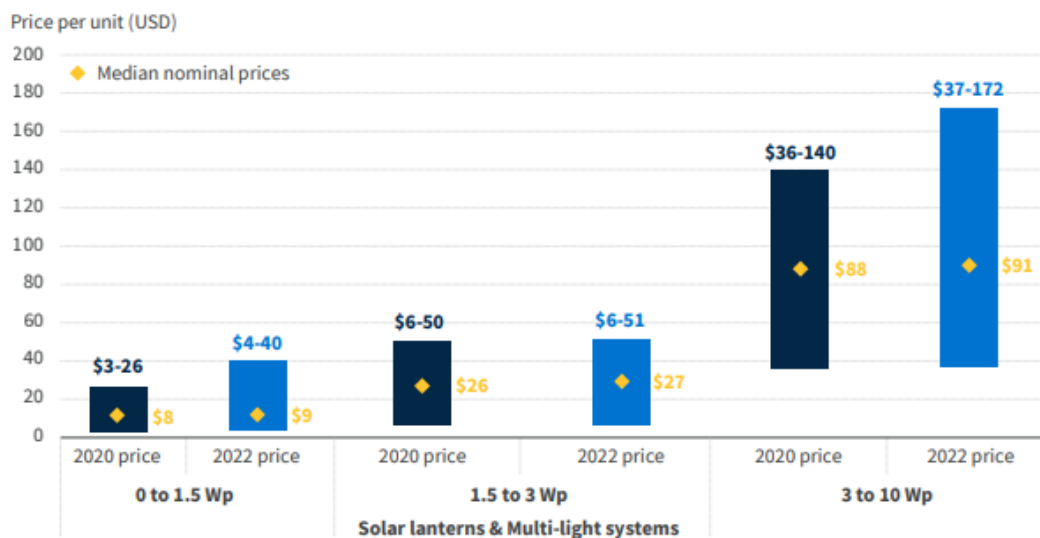


Ilustración 5. Precio sistemas iluminación (Lighting Global, 2022)

Como se puede observar, el precio de los equipos en 2022 es superior al de 2020. Esto se debe a la crisis provocada por la pandemia del Covid-19. La pandemia ha hecho aumentar los costes de los materiales y los logísticos, así como los tiempos de entrega. No solo ha aumentado el precio medio de los equipos, si no que el rango de precios es también superior, lo que indica una mayor competencia de precios y una diversificación en los sistemas ofrecidos.

Sin embargo, el uso de linternas solares y sistemas de iluminación múltiple permite a los usuarios acceder únicamente a electricidad para iluminación y carga de teléfonos, por lo que en el presente estudio no se contemplará su utilización. Se puede contemplar como un primer paso en el proceso de electrificar un hogar, pero no permiten dar acceso a todo lo que la Agencia Internacional establece como un servicio básico.

TELEVISIÓN

La televisión es en la mayoría de las ocasiones el medio de comunicación con mayor penetración, debido a que facilita el entretenimiento en los hogares, impulsa la capacidad de escuchar, observar y relacionar. Además, puede utilizarse como recurso educativo, ya que favorece la alfabetización. También permite el acceso a información nacional y global, especialmente para mujeres y niños quienes normalmente tienen un menor acceso a la educación. La pandemia del Covid-19 ha puesto de manifiesto su relevancia, permitiendo ofrecer información de salud pública. En muchas ocasiones, estos equipos

son la mayor motivación de los usuarios para adquirir un sistema solar de mayor potencia. La siguiente imagen muestra la relación del uso de la televisión con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

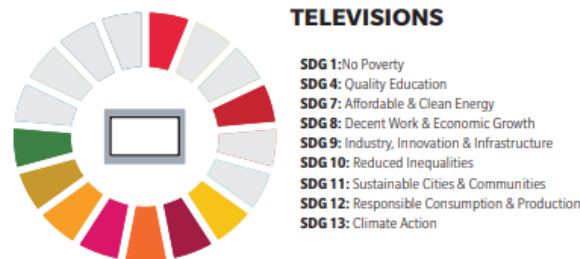


Ilustración 6. Relación TV con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021a)

La comercialización de televisiones fuera de red ha evolucionado rápidamente en los últimos años debido al crecimiento de la disponibilidad de modelos de TV eficientes que han impulsado la competencia y las economías de escala, resultando en reducciones considerables de precio. El índice de precio de las televisiones (precio relativo a su tamaño), ha mejorado en un 44% desde 2016. Además, su eficiencia ha mejorado de media en un 48% entre 2016 y 2021. Sin embargo, pese a estas mejoras, la eficiencia de estos equipos todavía varía mucho entre los diferentes modelos debido a la falta de estándares en el sector (Efficiency For Access Coalition, 2021b).

La siguiente tabla muestra algunas de las características principales de las televisiones fuera de red en 2021:

Tamaño	Precio medio	Consumo	Métricas de Desempeño	Innovaciones Tecnológicas
15"-24"	\$56-\$195 (media: \$115)	15W-39W	Luminancia: 51-387 cd/m ² EEI ⁸ medio: 10,01 in ² /W	Resistente a las fluctuaciones de voltaje Películas ópticas eficientes Compatibilidad con señal satélite, cable o USB Conectividad integrada a Internet Pantallas de cristal laminado
24"-32"	\$110-\$257 (media: \$181)	40W-30W	Luminancia: 133-230 cd/m ² EEI medio: 11,39 in ² /W	

Tabla 3. Comparación características TV (Efficiency For Access Coalition, 2021a)

Actualmente, las televisiones de 24-29" son las más demandadas. Según los vendedores afiliados de GOGLA, se está registrando un aumento en la demanda de las mayores de 30 pulgadas, mientras que las ventas de las más pequeñas (18-23" y <18") están cayendo (GOGLA, 2022). Esto refleja la preferencia de los clientes por televisores más grandes y un ejemplo de la mejora de su eficiencia, ya que estos equipos grandes utilizan ahora un consumo de electricidad similar al de los pequeños (Lighting Global, 2022).

⁸ EEI: Energy Efficiency Index definido como el tamaño de pantalla por W. A mayor EEI, mayor eficiencia de la TV.

En la sección de dimensionamiento del *Capítulo 3. SFA*, para seleccionar la televisión se optará por la que presente la menor potencia consumida posible, teniendo en cuenta las limitaciones de los sistemas. Además, se requerirá que la tensión de alimentación sea de 12Vcc y que el precio sea lo más reducido posible cumpliendo con los parámetros de calidad.

Otras consideraciones que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar una televisión para un sistema fuera de red incluyen que el equipo cuente con antena para recibir señal local y que permita la posibilidad de reproducir archivos en múltiples formatos, tanto en un posible DVD a incluir como vía USB y/o tarjetas SD.

TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN

Las tecnologías de información y comunicación en las comunidades rurales aisladas se pueden dividir principalmente en dos grupos: aquellas que ya están presentes en el mercado o que llegarán en poco tiempo y aquellas tecnologías que todavía se encuentran en un horizonte lejano, y que no se prevé que sean accesibles para los habitantes de la última milla en el corto plazo (como el Internet de las cosas).

Estas tecnologías permiten potenciar la economía de las regiones de la última milla. Gracias a ello, se apoya indirectamente también la mejora de la educación o del emprendimiento. La siguiente imagen muestra cómo influyen las tecnologías de información y comunicación en los ODS:

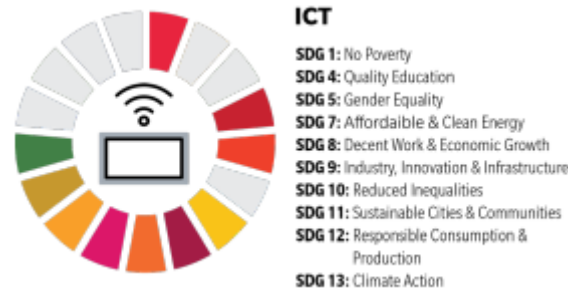


Ilustración 7. Relación tecnologías de la información y comunicación con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021c)

Dentro de las TIC presentes en el mercado actualmente podemos encontrar (además de las televisiones, las cuáles se han descrito previamente):

Teléfonos móviles

Su uso se encuentra en aumento dentro de las comunidades rurales aisladas. El aumento del uso de sistemas fotovoltaicos aislados permite a los usuarios tener la capacidad de cargar estos teléfonos móviles, hecho que hace incrementar su uso. Sin embargo, la energía que requiere un teléfono móvil actualmente para cargarse completamente puede ser parecida a la que consume un ventilador en el mismo tiempo. Por ejemplo, la carga estándar de un teléfono móvil requiere de 10Wh (5W durante 2h), mientras que actualmente existen ventiladores eficientes que consumen 6W, lo que supone 12Wh en esas mismas 2h. Por ello, todavía se requiere que se desarrollen teléfonos de bajo consumo que eviten que cargar el teléfono compita con las necesidades energéticas de otros equipos (Efficiency For Access Coalition, 2021c).

Radios

En países desarrollados, su uso está en declive, pero en regiones como África subsahariana o en áreas rurales de Iberoamérica representan el medio de información más empleado por las comunidades rurales. Por ello, muchos de los productos ofrecidos con SFAs son radios. En la primera mitad de 2020, se vendieron más de 225.000 radios para su uso en regiones fuera de red. Dada su madurez tecnológica, en los próximos años no se espera que mejore su eficiencia o su precio (GOGLA, 2022).

Discutidas estas tres tecnologías (teléfonos móviles, radios y televisiones), se ha decidido también analizar el uso de los ordenadores en las comunidades rurales aisladas. Pese a que representan una fuente de información de inestimable valor que puede contribuir en muchos otros sectores como la educación, su penetración en el mercado es muy inferior a la de los teléfonos y por supuesto, radios. En 2019, se estima que únicamente un 7,7% de los hogares tenía un ordenador en África y un 13% en la India. Esto se debe principalmente a que, comparado con los teléfonos móviles y las radios, los ordenadores son más caros y consumen más energía. Estos consumos se pueden ver reflejados en la siguiente imagen (Efficiency For Access Coalition, 2021c):

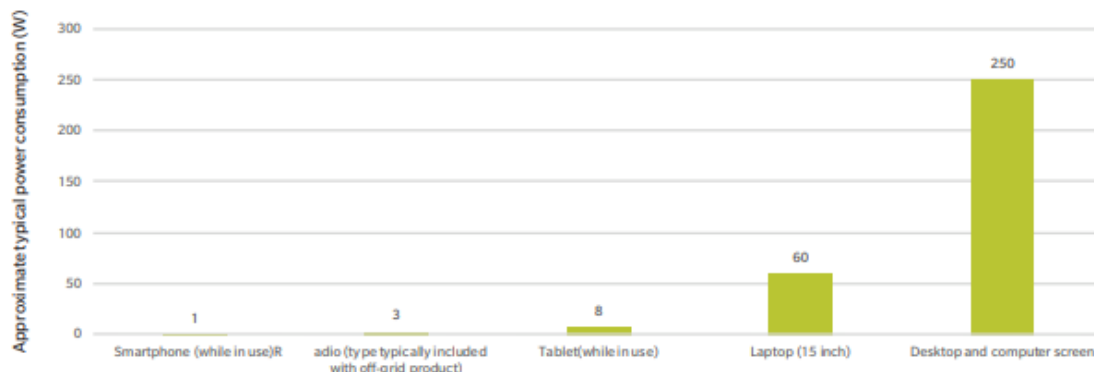


Ilustración 8. Comparación consumos radios, móviles y ordenadores (Efficiency For Access Coalition, 2021c)

Por consiguiente, en las comunidades rurales aisladas tiene más sentido el uso de tablets o laptops para el acceso a la información o entretenimiento, así como los DVDS.

VENTILADORES

Los ventiladores son uno de los dispositivos más asequibles entre los equipos domésticos demandados, debido a su bajo precio y su alto volumen de ventas. Su venta suele ser estacional, entre enero-junio en el Sudeste Asiático debido al clima y el tiempo. El Sudeste Asiático es el mercado más grande debido a su gran fabricación local y su tamaño de mercado (Lighting Global, 2022).

Los ventiladores permiten aumentar la actividad económica y trabajar más productivamente y durante más horas. En las explotaciones agrícolas y ganaderas proporcionan refrigeración activa y humidificación para los animales de granja. En los hogares, reducen la exposición a la contaminación y a los insectos transmisores de enfermedades, lo que mejora la salud y el bienestar de los usuarios. La siguiente imagen muestra la relación del uso de los ventiladores con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

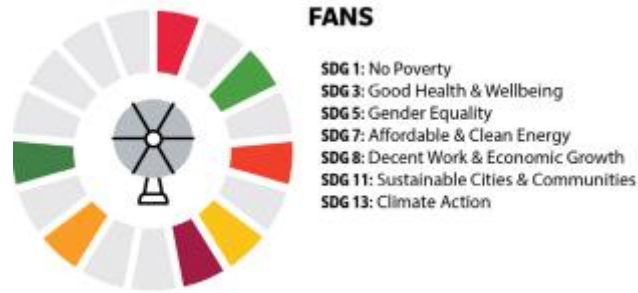


Ilustración 9. Relación ventiladores con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021d)

El motor es el elemento que tiene un mayor impacto en el consumo energético de un ventilador, junto con el diseño de las aspas. Los ventiladores que usan motores de corriente continua están mejor valorados por los usuarios debido a que proporcionan un servicio energético superior y menor ruido. Sin embargo, las características de los motores serán analizadas con mayor detenimiento en la sección dedicada a ellos de este mismo capítulo.

En los últimos años, la eficiencia de los ventiladores ha aumentado principalmente debido a mejoras en sus motores. Entre 2018 y 2019, la eficiencia media de los ventiladores ha aumentado en un 49%. Esto se debe al uso de motores de corriente continua, que aumentan la eficiencia de los ventiladores en un 39% respecto a los motores de corriente alterna, y al uso de aspas retorcidas y cónicas que pueden proporcionar un mayor flujo de aire a la misma velocidad y mejorar la eficiencia en un 15% (Efficiency For Access Coalition, 2021d).

El precio de los ventiladores ha caído en un 47% entre 2016 y 2018, pasando de \$2,7 a \$1,9 (en términos de \$ por longitud de diámetro de ventilador). Su precio varía en función del motor. De media, los ventiladores con motores de corriente continua son 1,7 más caros que los que usan corriente alterna. Aunque tengan un precio de venta mayor, los motores de corriente continua al ser más eficientes y duraderos permiten que sus costes de operación y mantenimiento sean menores.

Debido a que el uso de ventiladores está altamente relacionado con las condiciones climatológicas de una región, su precio varía mucho en función del mercado. Por ejemplo, el precio medio de un ventilador en India fue de \$20 mientras que en Kenya fue de \$40. En 2019, el 99% de las ventas a nivel global de estos equipos tuvo lugar en Sud Asia (Efficiency For Access Coalition, 2021d).

Los ventiladores con mayor presencia en el mercado junto con el tamaño de sus aspas son los siguientes:



Ilustración 10. Tipos ventiladores (Efficiency For Access Coalition, 2021d)

Los ventiladores de mesa se usan para enfriar espacios pequeños mientras que los de techo se utilizan en estancias de mayor tamaño. Los ventiladores de pedestal permiten ofrecer un servicio más adaptado a las necesidades del usuario debido a su altura y su rotación. A la hora de seleccionar un ventilador para el dimensionamiento del sistema en el *Capítulo 3. SFA*, se requerirá también que su tensión de alimentación sea de 12Vcc. Además, se considerará también que el caudal de aire proporcionado en relación con el precio del equipo sea adecuado.

Otra consideración que debe tenerse en cuenta a la hora de seleccionar un ventilador para su uso doméstico es la seguridad de las personas, es decir, que las aspas estén protegidas.

REFRIGERADOR/CONGELADOR

Los refrigeradores tienen un gran potencial para las comunidades rurales aisladas ya que permiten reducir el desperdicio de alimentos y la posibilidad de aumentar los ingresos económicos de las familias a través de nuevos modelos de negocio. En concreto permiten mejorar la salud de las personas y reducir la carga doméstica de mujeres y niños, quienes se suelen encargar de la recolección y preparación de alimentos. En hospitales y clínicas, la refrigeración es extremadamente importante para el almacenaje de vacunas. Además, permite a los pequeños comerciantes generar ingresos a través del almacenamiento de bebidas y artículos perecederos. La siguiente ilustración muestra la relación del uso de los refrigeradores con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

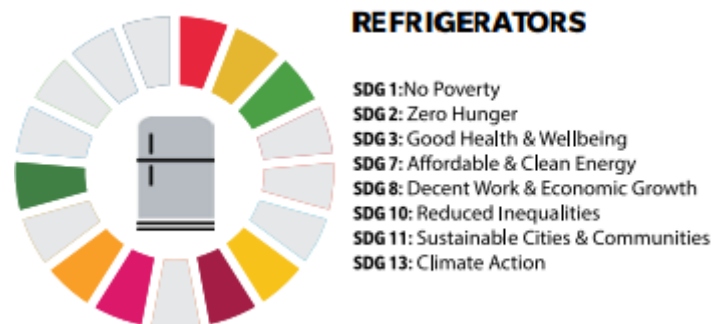


Ilustración 11. Relación refrigeradores con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021e)

Existen diversos tipos de refrigeradores adecuados para ser empleados bajo condiciones de energía limitada. Sin embargo, los refrigeradores con compresor se han impuesto como la tecnología más popular y viable, por lo que este estudio se centrará en ellos. Estos refrigeradores emplean un compresor para hacer circular un refrigerante y convertirlo de

líquido a gas, por consiguiente, requieren de electricidad para hacer operar el ciclo de compresión. A este proceso se le denomina evaporación, y permite enfriar el compartimento del refrigerador.

La tabla siguiente muestra una comparación de los diferentes tipos de refrigeradores con compresor:

Tipo	Definición	Fuente de alimentación
Refrigeradores de CC y refrigeradores/congeladores	En general presentan prestaciones de diseño más eficientes y están diseñados para ser empleados con un sistema de energía solar.	Sistema solar
Refrigeradores SDD⁹	Conectados directamente a un panel solar, suelen integrar una batería para poder funcionar de forma autónoma. La tecnología SDD emplea la energía solar para generar hielo, lo que permite que se mantenga frío el refrigerador.	Panel solar
Refrigeradores de CA	Actualmente son la opción más asequible para consumidores fuera de red, sin embargo, son menos eficientes que los refrigeradores de CC.	Red eléctrica, generador o sistema solar con inversor

Tabla 4. Tipos de refrigeradores de compresión (Efficiency For Access Coalition, 2021e)

Como se ha mencionado en la Tabla 6, los refrigeradores SDD se conectan directamente a un panel solar. La siguiente ilustración muestra un esquema de este tipo de refrigeradores con y sin batería:

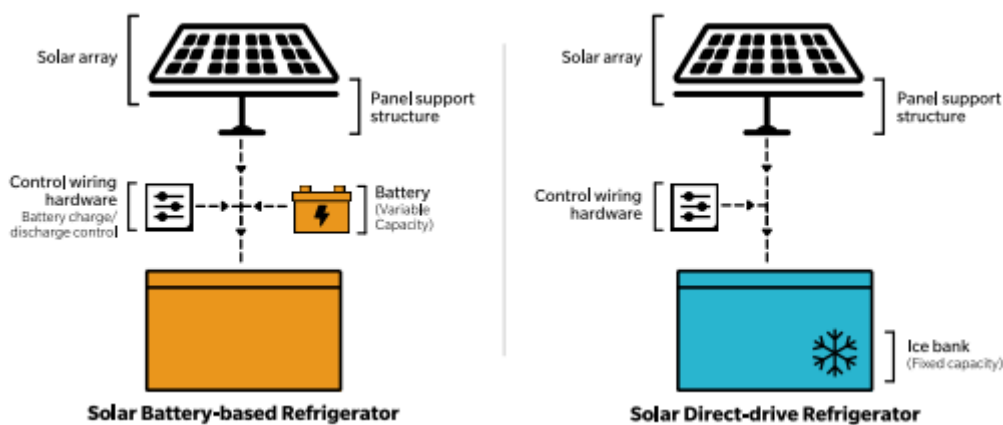


Ilustración 12. Refrigeradores solares con batería vs. sin batería (Efficiency For Access Coalition, 2021e)

⁹ SDD: Solar Direct Drive

Los refrigeradores son uno de los productos para los cuales es más difícil mejorar su eficiencia energética sin aumentar drásticamente su precio. Es uno de los equipos con mayor demanda, pero menor penetración en el mercado. Su demanda es mayor en aquellos hogares que ya cuentan con acceso a la electricidad a través de SFA, y que deciden aumentar la potencia de su sistema solar para tener acceso a estos equipos.

La siguiente tabla compara diferentes características de los refrigeradores de compresión:

Métrica	Refrigerador	Refrigerador SDD	Refrigerador- Congelador
Temperatura refrigeración	4-12°C	2-8°C	4-12°C
Temperatura congelador	-	-	0 a -18°C
Tamaño	15-240l	30-290l	45-270l
Autonomía media	3h	133h	1h
Consumo diario medio	0,5 kWh	0,6 kWh	1 kWh
Precio medio	USD 675	USD 1500	USD 430

Tabla 5. Comparación refrigeradores compresión (Efficiency For Access Coalition, 2021e)

Como se puede observar, uno de los mayores retos que impide que los refrigeradores se comercialicen a una escala mayor entre los usuarios de SFA es su asequibilidad. Sin financiación, el coste de los refrigeradores puede ser hasta 2,5 veces superior al ingreso anual del 50% de los hogares más pobres de las comunidades rurales aisladas.

Entre los tres tipos de frigoríficos, la combinación de refrigerador y congelador es la que cuesta menos (con una media de 430 dólares por producto), mientras que los frigoríficos cuestan aproximadamente el doble por unidad (media de 675 dólares por producto). Los refrigeradores SDD son los más caros (1500 dólares de media por producto, sin incluir el coste del panel solar). Sin embargo, pese a ser los más caros mostraron una reducción de precio del 83% en 2019 comparado con 2017, debido a que en 2017 se diseñaban únicamente para usos médicos (debiendo cumplir con altos estándares de calidad) y en 2019 para usos comerciales de menores requerimientos. Además, el coste de los refrigeradores SDD debe compararse con el coste de los frigoríficos normales en combinación con el coste de una batería de tamaño adecuado y su regulador de carga solar asociado (que puede oscilar entre 100 y 200 dólares), que las unidades SDD ya incluyen (Efficiency For Access Coalition, 2021b).

A la hora de seleccionar un refrigerador en el *Capítulo 3. SFA*, se requerirá que su tensión de alimentación sea de 12Vcc. Además, se procurará que su consumo no sea excesivamente elevado y que la capacidad de este sea adecuada. Dado su elevado consumo, cuando se deba hacer el dimensionamiento del sistema solar se plantearán dos consumos diferentes: uno que cuente con refrigerador en el hogar y otro que no.

MOTORES

Los motores eléctricos son los encargados de generar el movimiento necesario en muchas aplicaciones y equipos como los ventiladores o los compresores de los refrigeradores.

Todos ellos funcionan bajo el principio de que los campos magnéticos que existen entre el rotor, el componente giratorio, y el estator, el componente estacionario, generan movimiento. La diferencia entre los distintos tipos se encuentra en la manera de generar los campos magnéticos, que puede ser a través de bobinas alimentadas con corriente eléctrica o imanes permanentes.

Los motores de imán permanente presentan la ventaja de ser menos ruidosos y operar a menor temperatura interna. Además, requieren un mantenimiento menor. Su uso es el más apropiado para aplicaciones fuera de red debido a que requieren una corriente de arranque menor (hecho que les hace compatibles con fuentes de potencia menores), toleran voltajes fluctuantes y tienen una eficiencia mayor, lo que permite que funcionen durante más tiempos para una cantidad concreta de energía. Una de sus mayores desventajas es su elevado coste inicial (debido al coste de los imanes) (Efficiency For Access Coalition, 2021f).

Sin embargo, dada su mayor eficiencia, su uso permite que en los hogares se puedan alimentar equipos adicionales. Además, permiten abordar directamente el reto de la eficiencia en las ciudades en desarrollo (promoviendo la industrialización sostenible y fomentando la innovación), reducen la huella de carbono de la producción de energía y promueven la sostenibilidad medioambiental a través de equipos de larga duración que pueden ayudar a reducir los residuos electrónicos. A modo de resumen, la siguiente imagen muestra la relación del uso de motores de imán permanente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible:

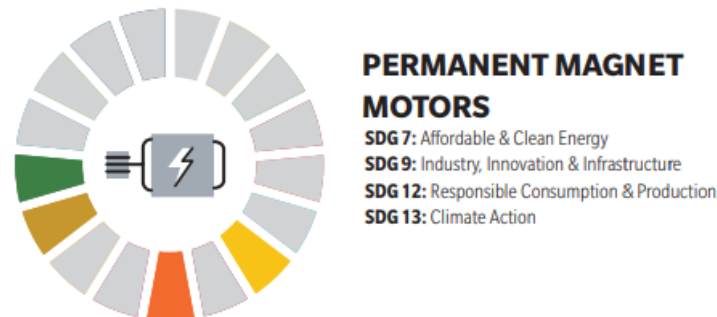


Ilustración 13. Relación motores imán permanente con ODS (Efficiency For Access Coalition, 2021f)

Como se ha comentado previamente, el uso de los motores de imán permanente está aumentando debido a su alta eficiencia. Su impacto en el coste final del equipo juega un papel importante en el desarrollo de su adopción. En equipos como los ventiladores, el coste del motor de imán permanente puede suponer hasta el 36% del coste total del equipo, un porcentaje muy alto para un equipo que debe tener un coste bajo. Aún con todo, el crecimiento del mercado de los SFAs está generando un cambio en los productores de los equipos, quienes tienden a recurrir al uso de motores de imán permanente para crear productos de mayor valor (Efficiency For Access Coalition, 2021f).

Por ejemplo, en la producción de ventiladores, el uso de un motor de imán permanente frente a uno de inducción puede reducir hasta en un 35% el consumo energético. Además, el uso de estos motores permite obtener equipos de menor tamaño y peso, y prolongar su vida útil. La siguiente imagen muestra una comparación de la energía consumida por un

motor de inducción y uno BLDC¹⁰ alimentando un ventilador durante 4 horas al día y un año:

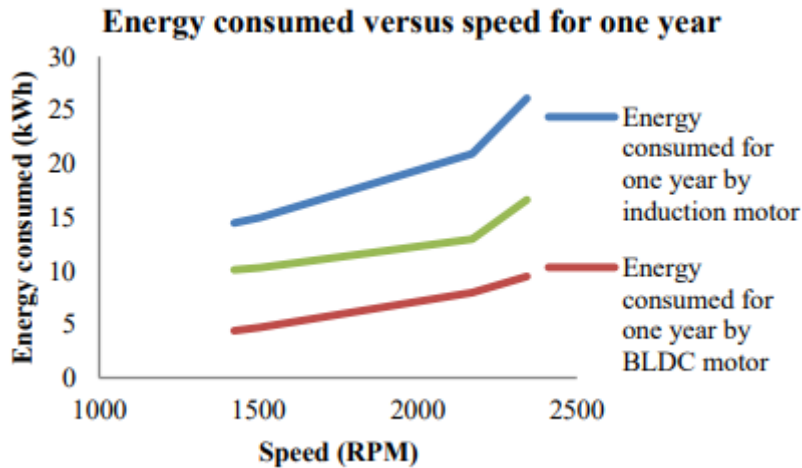


Ilustración 14. Comparación consumo motor de IP y de inducción (Nakuçi & Spahiu, 2018)

Por consiguiente, pese a tener un coste inicial alrededor del 20% superior, equipos como ventiladores equipados con motores de imán permanente pueden reducir hasta un 40% el consumo energético de los hogares. Esto permite que los usuarios puedan acceder a niveles de servicio superiores con un mismo sistema fotovoltaico (Efficiency For Access Coalition, 2021g).

Del mismo modo, la siguiente imagen permite comparar ventiladores de techo y de pedestal con motores de IP y con escobillas. Se puede observar que la EEI¹¹ es superior en aquellos que usan motores de IP, suponiendo un aumento de la eficiencia del 92% en ventiladores de pedestal y del 32% en ventiladores de techo.

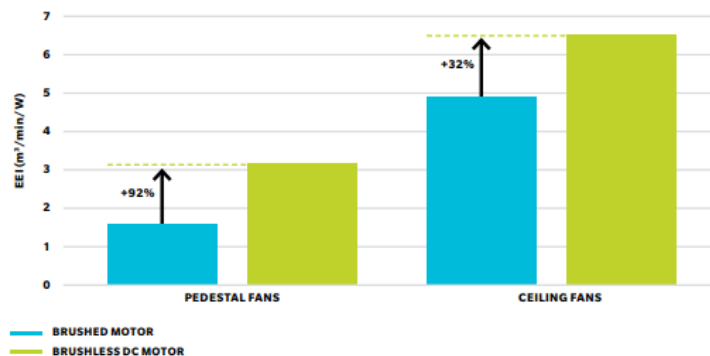


Ilustración 15. Comparación ventiladores con motores de IP y con escobillas (Efficiency For Access Coalition, 2021b)

2.4. Escalabilidad de los SFA

El acceso a la energía empieza con servicios básicos adaptados a la asequibilidad del usuario, y debe evolucionar hacia niveles superiores. Los sistemas fotovoltaicos deben poder ampliarse y adaptarse a niveles superiores aprovechando al máximo la inversión ya hecha.

¹⁰ Motor Brushless DC: motor síncrono de imán permanente.

¹¹ Energy Efficiency Index: definido como el volumen de aire aportado, en metros cúbicos por minuto, por W de potencia suministrado al equipo. A mayor EEI, más eficiente es el ventilador.

Se considera **escalabilidad** a la característica técnica de los sistemas de electrificación para adaptarse a niveles superiores aprovechando los sistemas previos existentes. La escalabilidad técnica de los equipos que permite toda la escalera de electrificación ya está garantizada con la tecnología actual, por consiguiente, se debe asegurar que los sistemas también lo sean, evitando así una barrera en el aumento del nivel de electrificación.

Por ejemplo, un usuario que dispone de un SFA que le proporciona un servicio de nivel 2, debería poder ampliarlo modularmente para acceder a un nivel 3. Y si en un futuro las circunstancias le permitieran pasar al nivel 4, se debería poder hacer mediante conexión (en CC o CA) con una central externa de generación y/o con otros usuarios formando una minired. Finalmente, si llegase la posibilidad de acceder al nivel 5, conectándose a la red eléctrica general, debería poder conectarse en CA a la red eléctrica general y gestionar el intercambio de energía.

Desde el punto de vista técnico ya existen equipos de estas características. Existen minirredes con generación distribuida en CC o en CA. Además, cada vez se dan más casos de conexión de SFAs o minirredes a la red general que están siendo regulados en los países bajo la denominación de autoconsumo, ya sea éste individual o comunitario. El estudio de (Muñoz, 2020) presenta diferentes casos de éxito del uso de minirredes para la electrificación en las Zonas no Interconectadas (ZNI)¹².

El presente trabajo tendrá en cuenta esta escalabilidad a la hora de dimensionar los sistemas. Es por ello, que el siguiente capítulo analizará las distintas generaciones de SFA, donde se verá que una de las características de los sistemas de tercera generación, los más actuales, es precisamente que permiten la escalabilidad del sistema en caso de que sea necesario.

¹² El término no interconectadas es exclusivo de Colombia. En el resto de los países se denominan zonas no electrificadas.

3. Sistemas Fotovoltaicos Aislados: tecnologías, características y dimensionado

El siguiente capítulo representa uno de los más importantes del trabajo dado que se va a realizar el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas se diseñarán para poder ofrecer un servicio eléctrico de nivel 3 en la escala MTF.

En primer lugar, se llevará a cabo un estudio de las distintas generaciones de SFA y se presentarán las características de los sistemas usados actualmente. Además, se analizarán los distintos componentes que conforman un SFA. Posteriormente, se realizará el dimensionado de los mismos, considerando diferentes hipótesis y tomando la decisión final en base a la que se ha considerado óptima para este caso. Finalmente, se ha comprobado la calidad del servicio ofrecido haciendo uso de la herramienta PVGIS, la cuál muestra si un sistema solar será capaz de suministrar toda la energía requerida por una demanda dada.

El dimensionado se ha realizado considerando el nivel de insolación de la Península Valiente de Panamá, el cuál será también estudiado a lo largo de este capítulo.

3.1. Definición Sistemas Fotovoltaicos Aislados (SFA)

Los sistemas fotovoltaicos fuera de red pueden variar desde un solo módulo y una batería que proporciona energía a cargas de corriente continua en una pequeña residencia, hasta un sistema grande que consta de una matriz con cientos de kilovatios de módulos fotovoltaicos, una gran batería y un inversor (o inversores) que suministra energía de corriente alterna a la carga. Cabe destacar que estos sistemas más grandes pueden incorporar un generador que utiliza combustibles fósiles o biocombustibles.

Se conocen como SFAs o kits solares, los sistemas que típicamente se instalan en viviendas rurales y que generalmente alimentan, mediante corriente continua, luces y pequeños electrodomésticos, o pequeños electrodomésticos de corriente alterna mediante el uso de inversores. Estos equipos suelen oscilar entre aproximadamente 10 Wp y 350 Wp de energía solar. El voltaje de corriente continua proporcionado a las cargas suele ser de 12 V, 24 V o 48 V.

La guía de diseño de VeraSol (VeraSol, 2022), resume los requisitos que hay que tener en cuenta para el diseño de sistemas fotovoltaicos fuera de red, tanto para aquellos que suministren únicamente corriente continua a la carga, sistemas que suministren corriente alterna a la carga y estén configurados como un sistema acoplado a corriente continua, sistemas que suministren corriente alterna a la carga y estén configurados como un sistema acoplado a corriente alterna y sistemas fotovoltaicos que incluyan un generador alimentado por combustible (sistemas híbridos).

A continuación, se van a mostrar imágenes de las distintas configuraciones existentes para los SFAs. Se excluirán las que incluyen generador dado que en este trabajo no se contempla su utilización. Posteriormente se mostrará una tabla comparativa con las ventajas e inconvenientes de cada configuración.

Como ya se indicó, la mayoría de las electrificaciones con SFA se hacen en CC. Esto se debe a su simplicidad ya que tanto los circuitos electrónicos, como los paneles solares y las baterías que forman parte del SFA funcionan con CC. En este caso, el esquema de funcionamiento del sistema sería el siguiente:

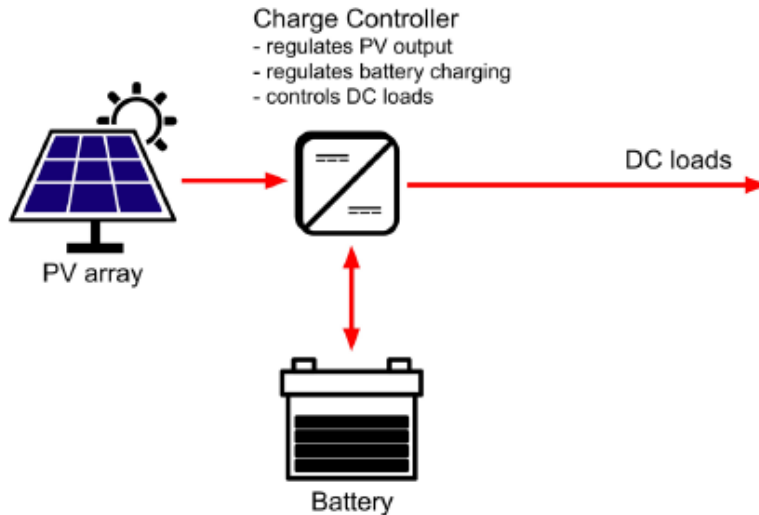


Ilustración 16. Configuración SFA en corriente continua (Lighting Africa et al, 2023)

Sin embargo, muchos de los electrodomésticos comercializados hoy en día que se utilizan en los sistemas conectados a red requieren de CA. Es por este motivo que para poder emplear estos equipos de SFAs se requiere de un equipo inversor. Este equipo transforma la CC de los paneles solares o de las baterías en la CA que necesitan los electrodomésticos. En este caso, se pueden diseñar dos configuraciones, una para que alimente cargas tanto en corriente continua como alterna y otra para que alimente únicamente equipos en CA:

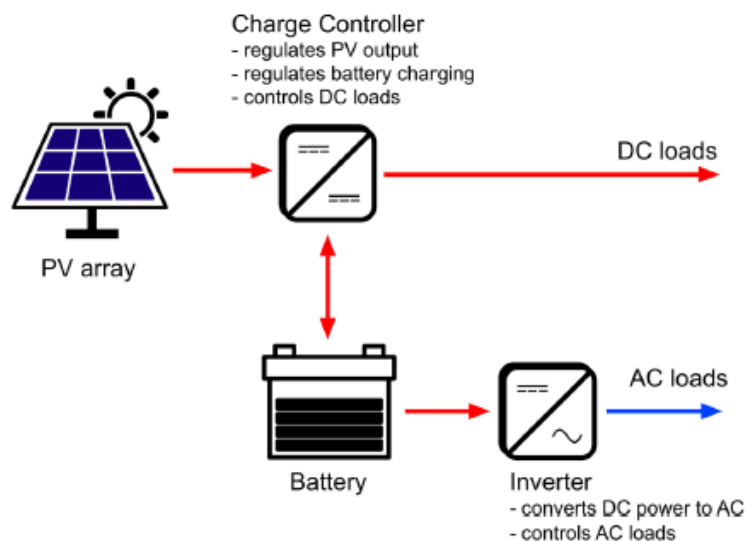


Ilustración 17. Configuración SFA en CC pero con alimentación de cargas en CC y CA (Lighting Africa et al, 2023)

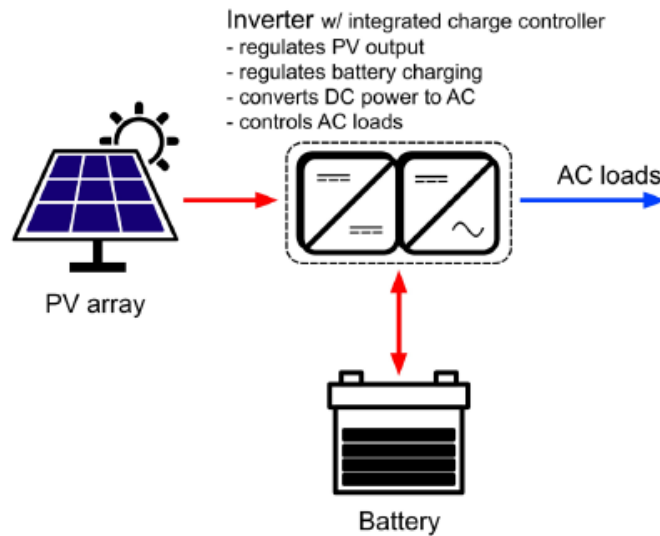


Ilustración 18. Configuración SFA en CA (Lighting Africa et al, 2023)

Cabe destacar que, tal y como se analizará más adelante, existen diferentes generaciones de sistemas fotovoltaicos aislados. Los empleados actualmente, los de 3ª Generación, incorporan en la batería el controlador de carga, por lo que se podría representar como un único componente. Sin embargo, las generaciones de SFA utilizadas anteriormente contenían dos equipos separados. En estos casos, y tal y como se muestra en las ilustraciones, la conexión entre los paneles y las baterías se realiza en CC, dado que es la conexión más efectiva económicamente y motivo por el que se ha decidido mostrar la conexión entre ellos de manera separada.

Para el uso de sistemas de mayores potencias, (generalmente correspondientes a usos productivos o comunitarios), se requiere un esquema más complejo denominado acoplamiento CA. En este caso, los paneles solares se conectan a un inversor solar CC/CA y la batería, a otro inversor bidireccional CC/CA. Con el objetivo de garantizar un funcionamiento coordinado de los dos bloques de potencia, el inversor solar debe ser compatible con el inversor/cargador de batería. Tal y como se ha mencionado previamente, este esquema es eficiente para conectar grandes cargas como cocinas y hornos eléctricos, equipos de frío, aires acondicionados o bombas de agua. Además, si se quiere preparar el SFA para una futura conexión permanente a la red eléctrica, la solución es simple y requiere de la misma configuración, pero asegurando que el inversor de la batería tiene la capacidad de conexión a una red externa y la electrónica de control asociada. El acoplamiento CA se puede ejemplificar de la siguiente manera:

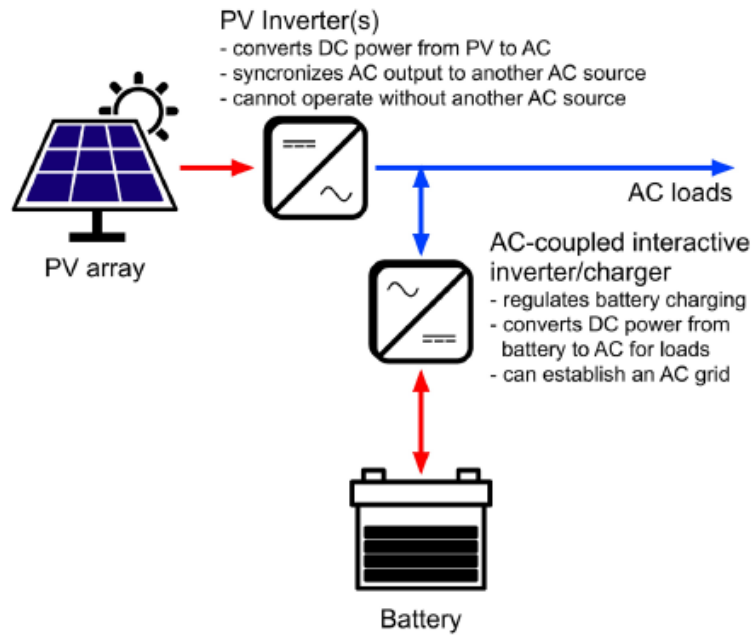


Ilustración 19. Configuración acoplamiento CA (Lighting Africa et al, 2023)

Tal y como se ha mencionado previamente, la siguiente tabla muestra a modo de resumen las ventajas e inconvenientes de cada una de las configuraciones:

Configuración	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones Apropriadas
Configuración en CC	Simple, no requiere inversor	No puede alimentar cargas en CA	Hogar con cargas en CC, donde no se esperan futuras conexiones en CA. Instalaciones típicamente inferiores a 1kW.
Configuración en CC pero con alimentación de cargas en CC y en CA	Puede alimentar cargas tanto en CA como en CC	El mantenimiento puede ser confuso en relación a las cargas en CA y en CC	Hogar con cargas en CA y en CC.
Configuración en CA	Menos componentes que en la configuración 2	Menos opciones de escalado dado que el inversor está combinado con el regulador de carga	Hogar con únicamente cargas en CA
Configuración acoplamiento CA	Se pueden conectar en paralelo múltiples paneles para aumentar la eficiencia de la carga diurna	Se requieren inversores separados	Hogar donde se prevén futuras conexiones de cargas en CA o futura conexión a la red

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes configuraciones (Elaboración propia)

3.2. Componentes de un SFA

Los Sistemas Fotovoltaicos Aislados actuales cuentan con un panel fotovoltaico, un regulador de carga, una batería y diferentes equipos consumidores. Actualmente, y para hacer un uso óptimo de la electrónica, el regulador de carga está integrado en la batería, tal y como se verá en la descripción de los sistemas de tercera generación.

El funcionamiento de un sistema fotovoltaico aislado de tercera generación se puede resumir en el siguiente esquema:



Ilustración 20. Esquema general SFA (Elaboración propia)

Como se puede observar, cuenta con tres bloques funcionales; generador, de acumulación y de consumo.

A continuación, se realizará una descripción de estos tres bloques principales que conforman un SFA.

3.2.1. Bloque generador

Está compuesto por los **paneles fotovoltaicos**. Se trata de una estructura hermética y rígida (módulo fotovoltaico), que ensambla un determinado número de células fotovoltaicas. Estas células proporcionan individualmente una tensión y corriente limitadas en comparación con las que necesita el sistema.

Actualmente, los paneles mayormente instalados son de silicio, y principalmente están hechos en base a dos tecnologías: monocristalina y policristalina. La primera tipología comprende paneles de mayor eficiencia, dado a que se fabrican con un único cristal de silicio de alta pureza. Al tener un elevado rendimiento, son apropiados para regiones donde la radiación solar no sea muy alta. Sin embargo, su coste es más elevado. Por el contrario, la tipología policristalina comprende paneles que son más económicos dado que su proceso de producción es más simple. Están constituidos por la unión de varios cristales de silicio. Al ser un tipo de paneles más sencillo, su eficiencia es también menor (Solarfam, 2020). Por consiguiente, si el presupuesto es un factor decisivo en la selección del panel, se recomendará el uso del silicio policristalino. Sin embargo, un condicionante importante para saber si se debe elegir un tipo de panel u otro será el clima. Se recomendará la instalación del panel solar monocristalino en climas fríos, con tendencias a tormentas o niebla, ya que este tipo de placas tienden a absorber mejor la radiación. Por el contrario, la instalación de paneles policristalinos será adecuada en regiones con climas cálidos, dado que estas placas absorben el calor a mayor velocidad y les afecta en menor medida el sobrecalentamiento.

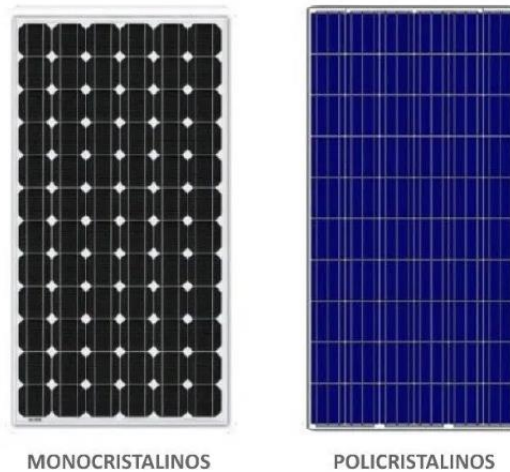


Ilustración 21. Tipologías paneles solares (Solarfam, 2020)

Los parámetros más importantes a la hora de estudiar los paneles fotovoltaicos son la curva de tensión-intensidad y la potencia máxima de salida en condiciones estándar, la cual se puede extraer de la curva de potencia-voltaje.

Estas curvas permiten observar cómo se comporta el panel y los valores de su tensión e intensidad de salida bajo unas condiciones ambientales específicas de trabajo. Generalmente viene dada para condiciones estándar de servicio STC¹³.

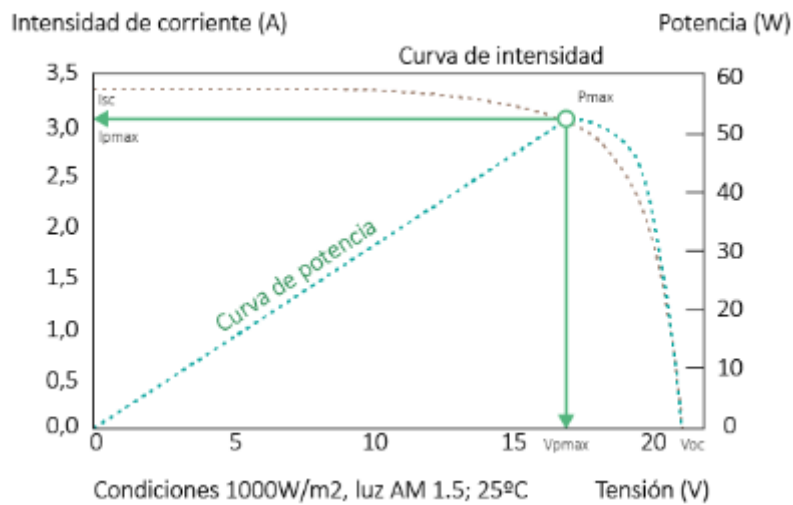


Ilustración 22. Curva I-V y P-V panel solar (AutoSolar, s.f.a)

Estas curvas permiten observar cómo afecta la radiación solar a la corriente de salida del panel. Para un mismo voltaje, la corriente aumenta a mitad que aumenta la radiación solar, como se puede observar en el siguiente gráfico:

¹³ STC: standard test condition. Se corresponden con una radiación solar de 1000W/m², temperatura de 25°C y masa de aire de 1.5. La masa de aire es la longitud del camino tomado por la luz a través de la atmósfera normalizado a la ruta más corta posible. El espectro estándar en la superficie de la Tierra se llama AM 1.5G (la G significa mundial e incluye la radiación directa y difusa).

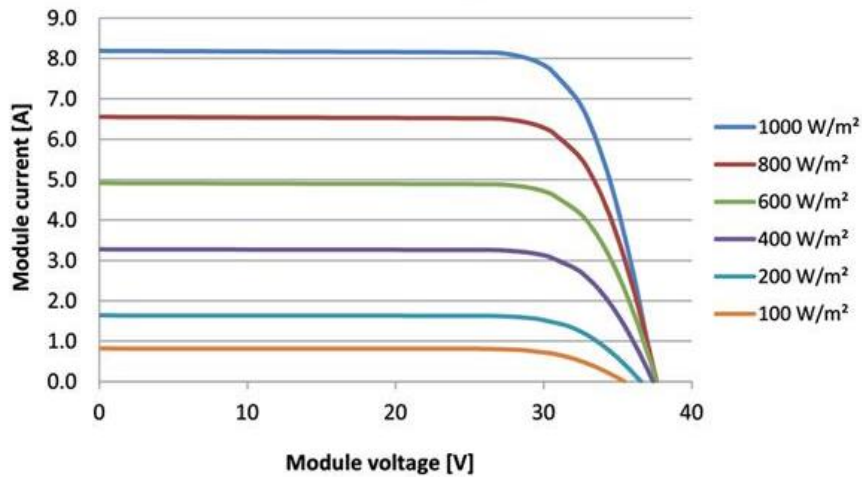


Ilustración 23. Curva I-V panel solar (Energética, 2011)

Además, permiten identificar si algún panel no está operando de forma óptima, y, por consiguiente, representa una reducción de la producción. Las curvas muestran el funcionamiento del panel en buen estado, de modo que todas las curvas de paneles con las mismas características y que sean diferentes al ideal implicarán una pérdida económica.

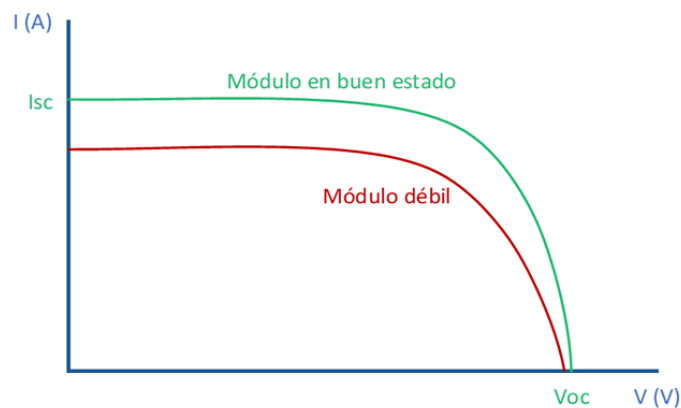


Ilustración 24. Curva I-V módulo en mal estado (Clever solar devices, 2020)

Un punto importante de la curva I-V es el punto de potencia máxima del panel (P_{max}), que se da cuando los valores de voltaje y corriente son los de máxima potencia (U_{max} e I_{max}). La potencia máxima de salida depende del tipo y eficiencia de las células que forman el panel, y se obtiene multiplicando I_{max} por U_{max} . El siguiente gráfico muestra un ejemplo de esta potencia máxima, representada en el rectángulo sombreado en verde:

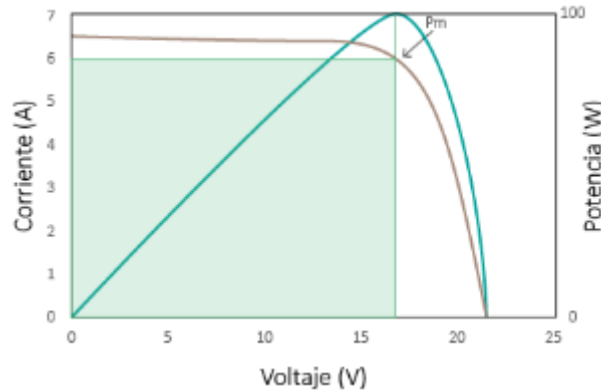


Ilustración 25. Ejemplo potencia máxima panel (AutoSolar, s.f.a)

En este ejemplo, el valor de potencia máxima (100W, se obtiene multiplicando el punto de máxima tensión ($U_{max}=18V$) por la corriente de salida máxima ($I_{max}=5,56A$).

El “valor pico” del panel fotovoltaico (W_p) se corresponde precisamente con el valor de potencia máxima para condiciones STC de trabajo. Este parámetro es el utilizado para dimensionar los paneles fotovoltaicos.

Como se puede observar, la información proporcionada por estos gráficos es importante para determinar el rendimiento y la eficiencia de los paneles solares, ya que la corriente y el voltaje son dos factores críticos que afectan la cantidad de energía que un panel solar puede generar.

Finalmente, dos factores que será importante tener también en cuenta a la hora de dimensionar los sistemas serán el ángulo de inclinación del panel y su orientación. El ángulo de inclinación del panel solar se define como el número de grados con respecto al plano horizontal. Una mala inclinación del panel solar puede dar lugar a problemas como ineficiencias. Un ángulo demasiado bajo no permitirá que el panel capte suficiente energía del sol, disminuyendo la energía que se genera. Del mismo modo, una correcta orientación del panel garantiza que este se encuentre ubicado perpendicularmente cuando el sol ofrece su mayor radiación, maximizando la producción energética.

Tanto el ángulo como la orientación de cada panel son específicos de la ubicación en la que se encuentre instalado, debiendo estudiarse cada caso individualmente.

3.2.2. Bloque de acumulación

Está principalmente constituido por la **batería** y el **sistema de gestión de batería**. Los SFA, al ser sistemas no conectados a la red, necesitan una batería que les permita cubrir las demandas energéticas en ausencia de radiación solar.

El elemento básico que conforma una batería es la celda. En ella se almacena la energía eléctrica. Estas celdas se agrupan en cajas y se equipan con conectores. La tensión nominal de la batería dependerá de la suma de los voltajes de las celdas que la componen. A la hora de definir una batería, existen diferentes parámetros que deben considerarse. Entre ellos destacan:

- Autodescarga: pérdida de carga de la batería al permanecer en circuito abierto.
- Capacidad nominal: cantidad de carga eléctrica que se obtiene de una descarga completa de la batería, manteniendo la tensión nominal (medida en Amperios-hora). El factor más importante del que depende es el régimen (rapidez) de

descarga, hecho por el que se establecen diferentes capacidades en función de este régimen (ejemplo: $C_{10}=100$ Ah indica que la batería es capaz de entregar 10A durante 10h).

- Profundidad de descarga (DOD): cantidad de carga extraída de la batería. Se expresa como un porcentaje respecto de la capacidad nominal. Este valor está inversamente relacionado con el estado de carga de la batería (SOC), es decir, que si la batería está cargada al 100% (SOC), el DOD de la batería en ese momento sería del 0%. Este hecho queda ejemplificado en la siguiente ilustración:

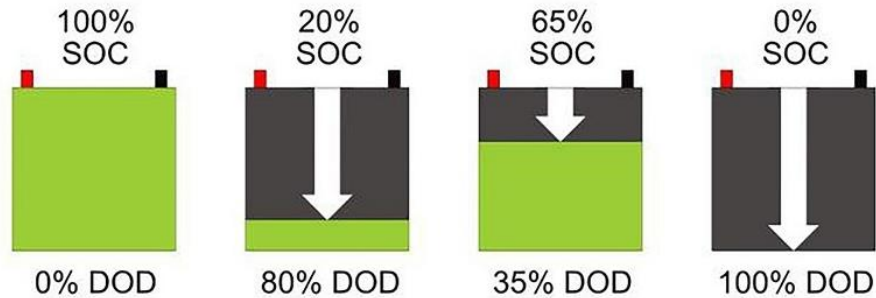


Ilustración 26. Representación DOD y SOC baterías (Cambio Energético, 2022)

- Ciclos de vida: un ciclo representa un periodo de carga y descarga. El número de ciclos de vida en la vida útil de la batería depende principalmente de la profundidad de descarga a la que se ve sometida y de las características físicas de la batería.

Respecto a la tipología de baterías a usar, existen también distintas tecnologías en función del material empleado para su construcción. Entre ellas destacan las baterías de plomo, de gel y de iones de litio. Dentro de las de iones de Li existen baterías de Li ferrofosfato (LFP) o con otros metales que aumentan su capacidad como el Co o el Mn. Como se verá posteriormente, los sistemas empleados hoy en día (los de tercera generación), utilizan baterías de ferrofosfato de litio (LFP). Sin embargo, en esta sección se analizan otras tecnologías de baterías que han sido empleados en generaciones anteriores o en instalaciones de gran capacidad, de modo que se puedan comparar las características principales de cada una de ellas. Hay que resaltar que las baterías de Pb usadas para los SFA son especialmente adaptadas para cargas profundas.

Una de las curvas más representativas de una batería es la de número de ciclos en función de la profundidad de descarga. A continuación, se muestra un ejemplo de este gráfico:

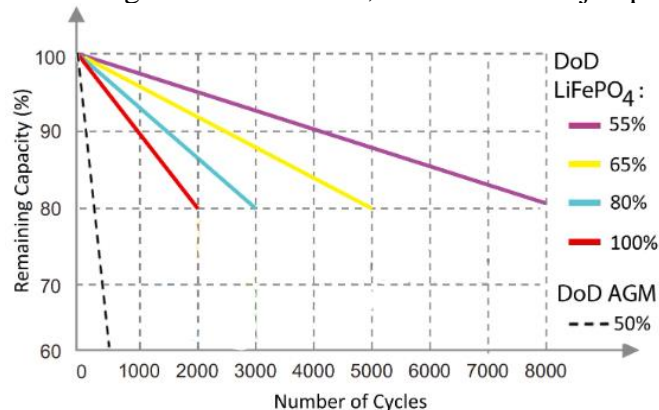


Ilustración 27. Ciclos de vida vs. Profundidad de descarga baterías AGM y ferrofosfato (PowerTech, 2022)

El gráfico mostrado pretende ilustrar que, a mayor profundidad de descarga, disminuye la vida útil de la batería. Sin embargo, actualmente existe baterías que ofrecen una vida útil superior a los 3.000 ciclos con una profundidad de descarga del 100%, como las comercializadas por Zimpertec¹⁴.

En la selección de la tecnología de la batería se tendrá en cuenta su capacidad de carga y la energía almacenada, su eficiencia y su profundidad de descarga. Además, cabe destacar también que el peso jugará un papel importante, dado que un elevado peso de la batería encarece la reposición y el traslado del sistema.

Característica	Batería de plomo	Batería de gel	Batería de litio
Composición	Ácido	Ácido en gel	Sal de litio
Peso	Elevado	Elevado	6 veces menos ¹⁵
Eficiencia de carga	85%	65%	97%
Vida útil	Cerca de 2 años	Alrededor de 5 años	Cerca de 10 años
Mantenimiento	Continuo	No requieren mantenimiento	No requieren mantenimiento
Precio¹⁶	Medio	Elevado	Muy elevado ¹⁷

Tabla 7. Características baterías (Elaboración propia)

Las baterías de gel son una versión mejorada de las baterías de plomo-ácido, ya que tienen electrolitos en forma de gel, lo que supone grandes ventajas en su funcionamiento. Es por ello que suponen una alternativa especialmente atractiva para su uso en sistemas fotovoltaicos aislados, dado que pese a tener un precio más elevado que las baterías de plomo, también tienen una mayor duración. Al no requerir mantenimiento pueden colocarse en lugares de difícil acceso. Estas baterías han sido utilizadas en sistemas de segunda generación (Intesur, 2020) y se siguen usando para instalaciones que requieren una elevada energía almacenada.

Sin embargo, los sistemas de tercera generación utilizan normalmente baterías de LFP, por las grandes ventajas que presentan. Pese a que muchas de sus ventajas se pueden observar en la tabla mostrada previamente, a continuación, se redactan otras:

- Mantienen prácticamente el 100% de potencia hasta el momento de la descarga. Pueden no utilizarse durante largos períodos de tiempo sin que se descarguen, de modo que al volver a utilizarse no es necesario recargarlas.
- Son muy seguras, no explotan ni se incendian con sobrecargas.
- Funcionan hasta a 60°C sin disminuir su rendimiento.
- Se pueden instalar en cualquier posición.
- Se cargan a mayor velocidad que otro tipo de baterías.
- Respecto a otras químicas de iones de Li, no requieren metales escasos y caros como manganeso o cobalto.

¹⁴ <https://www.zimpertec.com/SHS-Components/Lithium-Battery-Systems/>

¹⁵ A igual capacidad nominal, el peso es del orden de 6 veces inferior, pero al ser su profundidad de descarga más del doble de las de Pb para la misma vida útil, permite reducir la capacidad nominal a la mitad para igual prestaciones. En conjunto el factor de mejora en el peso es del orden de 10.

¹⁶ Aunque la tendencia general del precio de las baterías ha sido y se prevé que será a la baja, esto es más acusado en las baterías de Li debido al desarrollo del mercado para las baterías de los vehículos eléctricos.

¹⁷ El efecto, ya comentado, de una menor capacidad nominal para igual prestaciones, unido a la mayor duración de la vida útil, hace que el precio real sea muy competitivo.

- Mayor número de ciclos, lo que significa mayor duración de la vida útil.

A diferencia de lo que sucede con las baterías de plomo-ácido, se considera práctico utilizar habitualmente el 90% de la capacidad nominal de las baterías de litio, y ocasionalmente, incluso más. Estos valores dependen por ejemplo de la velocidad de carga, pero sobre todo de la calidad de las celdas utilizadas (celdas de alta calidad, clasificadas y ajustadas entre sí).

Las normas IEC consideran que con una capacidad remanente del 80% de la capacidad nominal se agota la vida útil de la batería. Sin embargo, en muchas aplicaciones estacionarias, con dicha capacidad remanente se puede dar un servicio adecuado si la batería está sobredimensionada. Como se puede observar, cuánto mayor es la profundidad de descarga menor es la vida útil de la batería, ya que nos proporciona menos ciclos de uso. Esto se debe a que la extracción de energía de la batería a niveles más profundos de descarga puede causar daños permanentes a la estructura química de la batería, lo que resulta en una reducción de su capacidad y un acortamiento de su vida útil.

Dadas las anteriores consideraciones, actualmente las baterías LFP se presentan como las más adecuadas para su uso en SFAs instalados en regiones de la última milla.

El segundo componente del bloque de acumulación es el **sistema de gestión de la batería**. Este dispositivo electrónico permite controlar el estado de carga de las baterías y el equilibrado de carga de las celdas de litio. Se encarga de controlar el flujo de energía que circula entre los paneles fotovoltaicos y las baterías, asegurando que las baterías reciben una correcta intensidad de carga que permita alargar su vida útil.

Dado que la energía proporcionada por el panel no siempre es constante, el regulador de carga permite tanto evitar sobrevoltajes como que la batería se descargue por completo. Por ejemplo, en un sistema que no contase con regulador de carga, en el momento en el que las baterías estuvieran cargadas, el sistema solar seguiría produciendo corriente, hecho que sobrecargaría la batería.

Existen dos tipos de reguladores de carga; el PWM (Pulse-Width Modulation) y el MPPT (Maximum Power Point Tracking) (AutoSolar, s.f.b).

El regulador PWM corta el paso de energía entre los paneles y las baterías cuando estas se han cargado completamente. En este punto, la energía que pueden seguir proporcionando los paneles y que no producen porque están desconectados de la batería, se pierden. Además, con este regulador los paneles están obligados a trabajar a la tensión de la batería, hecho que puede producir pérdidas de rendimiento.

Sin embargo, presenta las ventajas de ser más económico y tener un reducido peso, hecho que facilita su transporte. El factor económico hace más atractivo al regulador PWM en aplicaciones donde el coste es un factor importante y no hay restricciones de superficie para el panel solar, como es el caso de los SFAs para la última milla. Además, estos reguladores son más simples que los MPPT, hecho que facilita su instalación y operación. Por otro lado, el regulador MPPT utiliza el 100% de la energía que pueden suministrar los paneles, ya que controla la tensión de la batería permanentemente, funcionando siempre en punto de máxima potencia del panel. Además de cortar el paso de corriente hacia la batería cuando se encuentra cargada, este regulador permite trabajar con los paneles a la tensión que más se adecúe en el momento para así extraer la máxima potencia.

El siguiente gráfico muestra la diferencia entre la máxima potencia que se puede extraer de un panel si se utiliza un regulador PWM o MPPT. Mientras que un regulador PWM reduce la tensión del panel a la tensión de la batería, el regulador MPPT es capaz de elegir el punto óptimo de la curva en el que trabajar en cada situación. Como se puede observar, la diferencia entre las áreas mostradas en el gráfico representa claramente que la potencia es mayor cuando se emplea un regulador MPPT.

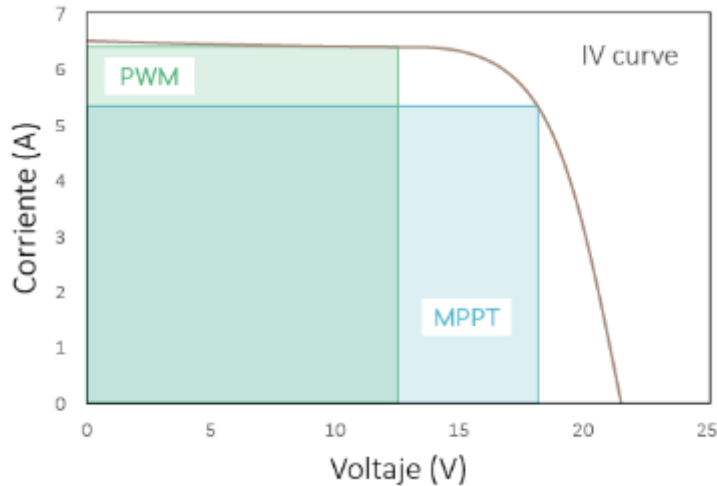


Ilustración 28. Curva I-V panel con regulador PWM y MPPT (AutoSolar, s.f.a)

Como se ha indicado anteriormente, otra función que se integra en el bloque de gestión de la batería cuando es de Li, es el reparto de energía entre las diferentes celdas de la batería para garantizar su carga equilibrada.

3.2.3. Bloque de consumo

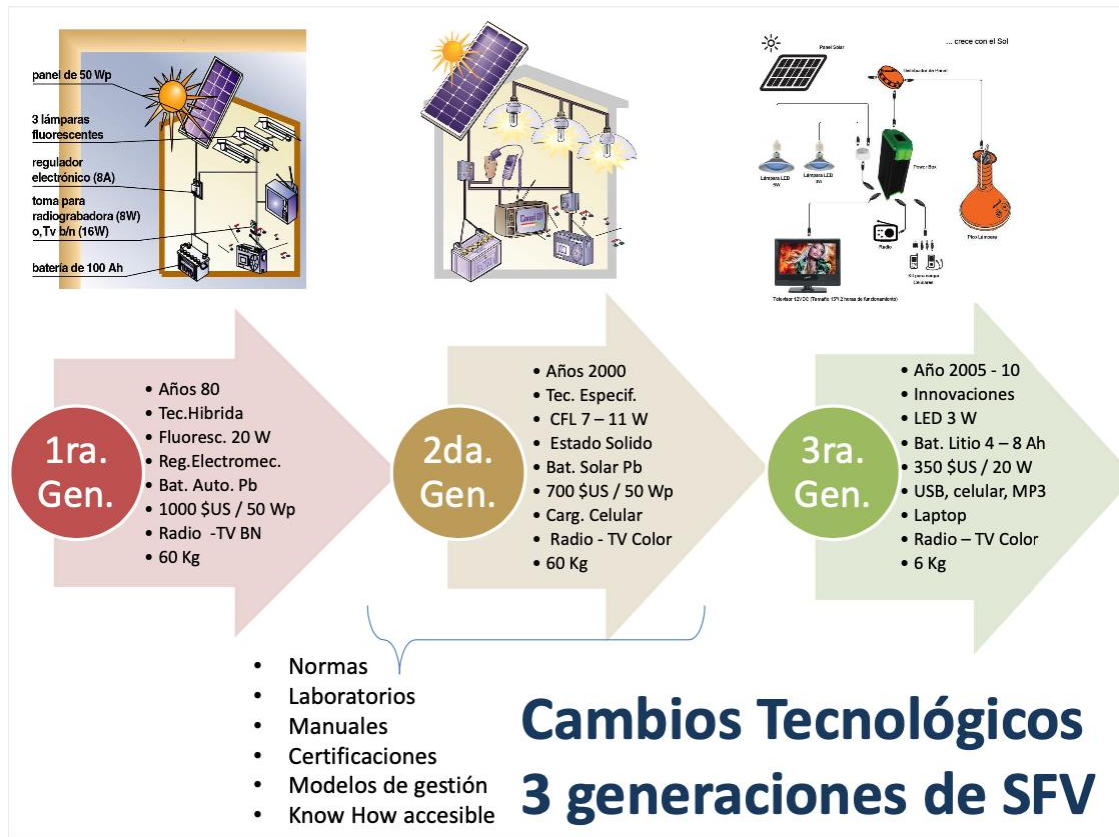
Está constituido por el conjunto de equipos consumidores alimentados por cada sistema. La potencia del sistema solar y la capacidad de la batería limitarán la energía consumida por el número de equipos que se pueden conectar. En el capítulo referente a nivel de acceso se ha indicado las características de los diferentes equipos consumidores.

Sin embargo, es necesario hablar en esta sección del alcance de los sistemas fotovoltaicos autónomos. En general, los sistemas suelen incorporar iluminación en forma de LEDs eficientes, los cuáles proporcionan más de 100 lúmenes por cada vatio consumido. Por el contrario, el resto de los equipos deben ser adquiridos por los usuarios de los SFAs. La aparición de la tecnología PAYG, que permite la disponibilidad de energía del SFA contra el pago de la cuota periódica, ha mejorado la asequibilidad de los mismos, permitiendo que los usuarios, en el modelo de venta financiada, dispongan de una nueva forma de financiación que les permite acceder a su compra de manera más sencilla, y en el modelo de energía como servicio, se facilite el corte y reposición por impago de la tarifa.

3.3. Evolución de los SFA

La configuración técnica de los SFAs utilizados para la electrificación global ha sido similar en muchos de los países del mundo, constituidos principalmente, tal y como se ha mencionado previamente, por un bloque generador, bloque acumulador, y bloque de consumo. Durante los últimos años se han desarrollado importantes innovaciones tecnológicas para introducir nuevas generaciones de sistemas fotovoltaicos. La siguiente

ilustración muestra como han ido evolucionando los sistemas, así como las cargas que pueden ser conectadas a ellos:



Los avances tecnológicos están permitiendo que las nuevas generaciones de SFAs se caractericen por una mejora de su eficiencia energética, una importante reducción de su coste de inversión, una menor tasa de fallos y una mejora de su portabilidad, facilidad de uso e instalación, además de su capacidad de escalado a sistemas de mayor potencia o funcionalidad.

En 2020, se aprobó la nueva normativa de la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) que establece los estándares de calidad de los sistemas fotovoltaicos fuera de red¹⁸. Con esta normativa, se han actualizado los criterios que deben cumplir estos sistemas con potencias menores o iguales a 350Wp, diferenciando entre (VeraSol, 2020):

- Productos de potencia menor o igual a 10Wp (pico-fotovoltaicos).
- Productos de potencia mayor a 10Wp (SFA).

Sin embargo, este documento se centrará en el estudio de los SFAs, ya que estos sistemas permiten la conexión de mayores equipos y aseguran que el servicio eléctrico proporcionado a los hogares sea fiable y duradero. Los SFAs facilitan un nivel de servicio de 2 o 3 del MTF, y son una solución ideal para áreas rurales y remotas donde la conexión a la red eléctrica convencional no es posible o es costosa. Al entender mejor cómo funcionan estos sistemas y cómo se pueden optimizar para proporcionar una fuente

¹⁸ Posteriormente en este mismo capítulo se analizará con mayor detalle la normativa técnica y de calidad de los sistemas.

confiable de energía, se puede mejorar la vida de las personas en estas áreas y ayudar a impulsar el desarrollo sostenible en todo el mundo y una electrificación universal.

La evolución de los SFAs se puede resumir principalmente en tres generaciones. A continuación, se detallan las características de cada una de ellas.

Sistemas de 1ª Generación (SFA1G)

Los SFAs utilizados en la electrificación rural aislada aparecieron en los años 70 como proyectos de demostración y en 1978 se reportaron las primeras instalaciones con un coste de módulo de 14,7 a 18,3 USD/Wp (Fernández Fuentes, 2021). Es decir, un módulo de 120 Wp por ejemplo, tendría un coste de entre 1760 USD y 2196 USD, precios considerablemente altos si los comparamos con los actuales¹⁹.

Las características de los SFAs instalados en zonas rurales entre 1980 y 1995 tenían una configuración típica que se puede resumir en el siguiente diagrama:

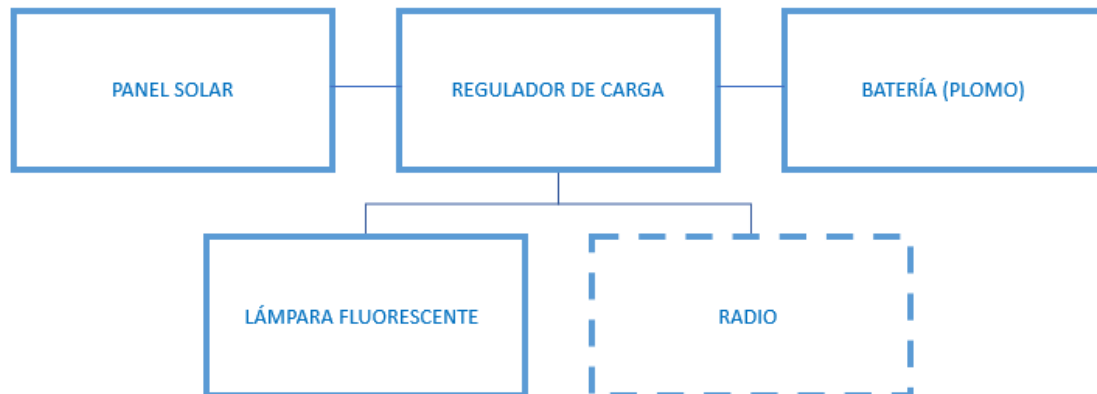


Ilustración 30. Esquema SFA 1ra Generación (1G-SFA) (Elaboración propia)²⁰

Estos sistemas tenían una eficiencia energética relativamente baja, ya que sólo eran capaces de convertir en electricidad una fracción de la energía solar que recibían. Además, la fabricación de estos sistemas es costosa y requiere mucho tiempo y energía. A pesar de estas limitaciones, los sistemas fotovoltaicos de primera generación fueron pioneros en la tecnología solar y sentaron las bases para el desarrollo de tecnologías más avanzadas en las décadas siguientes.

Sistemas de 2ª Generación (SFA2G)

Entre los años 1995 y 2000, se percibió un proceso de evolución de la tecnología fotovoltaica que dio lugar a una nueva generación de SFAs. Las preocupaciones sobre la calidad de los componentes, su eficiencia y la forma de realizar las instalaciones impulsaron el desarrollo y uso de estándares técnicos y protocolos.

Como resultado, se cambiaron los componentes de los SFAs, presentando las siguientes características: paneles fotovoltaicos de tecnología cristalina, lámparas CFL fabricadas

¹⁹ En el capítulo 8. Modelo Financiero se estudiará el coste de instalación de los sistemas fotovoltaicos. Se ha estimado que el coste actual de los materiales más la instalación de un módulo de 120Wp puede ser de unos 400 USD, muy inferior a los que presentaban los sistemas de primera generación.

²⁰ El elemento representado en línea discontinua no se incluye en el alcance de suministro del SFA.

para 12Vcc y baterías de plomo-ácido adaptadas para uso específico en sistemas fotovoltaicos, entre otras. Estos sistemas incorporaban enchufes para poder cargar los teléfonos móviles y televisiones en 12Vcc. La siguiente ilustración presenta un esquema de los SFA2G:

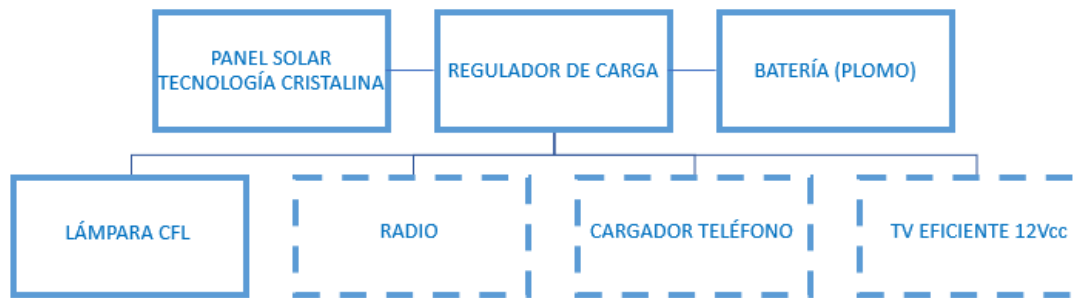


Ilustración 31. Esquema 2G-SFA (Elaboración propia)²¹

Los SFA de segunda generación fueron considerados como una solución robusta y aceptada para el suministro de energía eléctrica en áreas rurales dado que fueron desarrollados con equipos diseñados específicamente para optimizar el uso de la energía solar, impulsando la generación de normas y estándares (Fernández Fuentes, 2021).

Sistemas de 3ª Generación (SFA3G)

Durante el período de 2005-2015, los avances tecnológicos fueron migrando, permitiendo la configuración de un nuevo tipo de SFA. En este tiempo los diferentes componentes de los SFAs evolucionaron aceleradamente tanto en el almacenamiento de energía, en la iluminación, en el uso de microelectrónica integrada y en la interconexión entre sus componentes. El avance en la eficiencia de los equipos demostró que los mismos beneficios que ofrecían los SFA2G podían cubrirse con otras tecnologías, lo que permitía reducir su precio significativamente. La siguiente imagen muestra una evolución en el precio de estos equipos:

²¹ Los elementos representados en línea discontinua no se incluyen en el SFA.

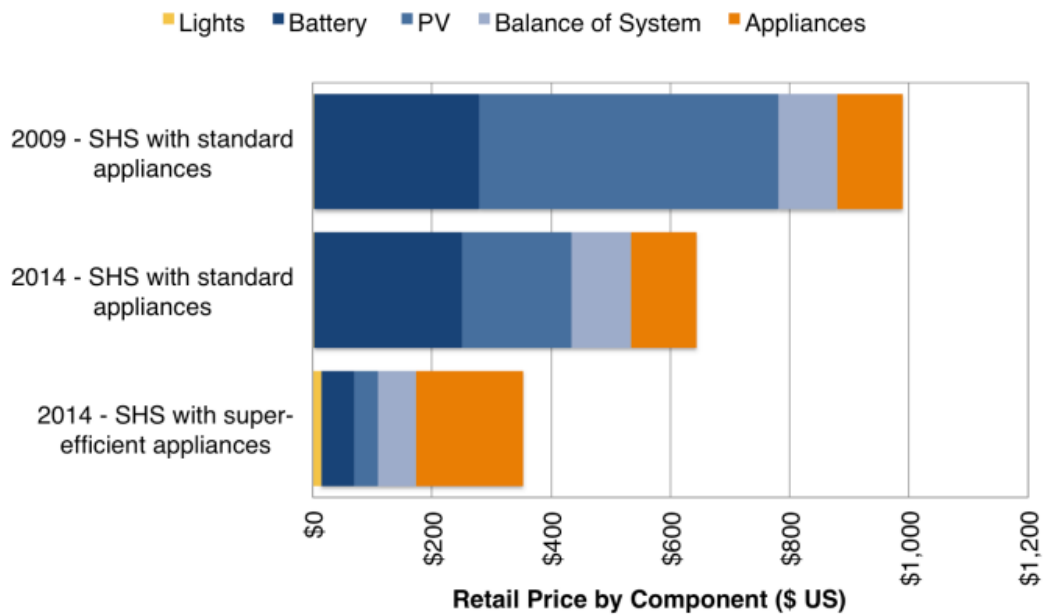


Ilustración 32. Precio venta al público para 3 tipos de SFA con los mismos beneficios energéticos (Phadke et al, 2015)

Estos avances dieron lugar a lo que hoy en día se conoce como sistema fotovoltaico de tercera generación, SFA3G, el cual incorpora innovaciones tecnológicas en un diseño eficiente y compacto. Sus principales características se presentan a continuación:

- Baterías recargables de alta densidad y pequeño tamaño, principalmente de ferrofosfato de litio y hierro, reemplazando a las baterías de plomo-ácido.
- Sistema de gestión de batería (Battery Management System-BMS) basado en microelectrónica integrada, incorporando todas las funciones de control y protección de la batería, con puertos USB y con posibilidad de incorporar el sistema de pago (PAYG), ubicado junto a la misma batería.
- Uso de lámparas LED de alta eficiencia.
- Diseño fácil de instalar y sin necesidad de hacer conexiones eléctricas (lógica plug and play).

Su configuración se puede resumir en el esquema mostrado a continuación:

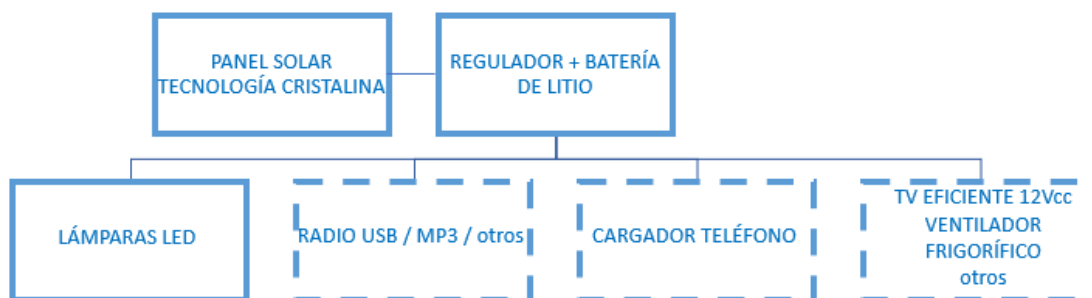


Ilustración 33. Esquema equipos SFA3G (Elaboración propia)²²

²² Los elementos representados en línea discontinua no se incluyen en el SFA.

Como se puede observar, los SFA3G presentan claras ventajas en aspectos económicos, técnicos y logísticos sobre los SFA2G. Por consiguiente, son la solución más adecuada en términos de eficiencia económica, social y ambiental.

Comparativa Sistemas SFA2G y SFA3G

A continuación, se va a realizar una comparativa de los SFAs de segunda y tercera generación, considerando su vida útil y su forma de instalación.

Vida útil

Los sistemas de tercera generación tienen unas características innovadoras que se reflejan en la incorporación de lámparas LED, baterías de litio y microelectrónica para el control del sistema.

Las lámparas LED conllevan una clara aceleración en el acceso universal a la iluminación, debido al incremento que representan en la calidad y el descenso paulatino de precios. Un estudio realizado en 2019 refleja que, considerando un tiempo de uso diario de 3 a 4 horas, las lámparas LED pueden tener una vida útil de 15,4 a 11,5 años (Fernández Fuentes, 2021). En cambio, las lámparas fluorescentes, empleadas en los sistemas de segunda generación, tienen una vida útil de 5 a 3,5 años (Ministerio, 2013).

Asimismo, las baterías de litio presentan también una vida útil mayor comparada con baterías de otro tipo. Los avances tecnológicos han logrado que estas baterías puedan tener una vida útil de alrededor 10 años. Este valor es muy superior al de baterías de otro tipo como las de plomo ácido (5,5 años) o níquel cadmio (2,9 años) (Narayan, 2019).

Finalmente, un seguimiento realizado por ENERGÉTICA²³ en equipos instalados en Bolivia ha mostrado que los componentes de los sistemas de tercera generación menos duraderos tienen una vida útil de al menos 10 años (entre los que se encuentra principalmente la batería).

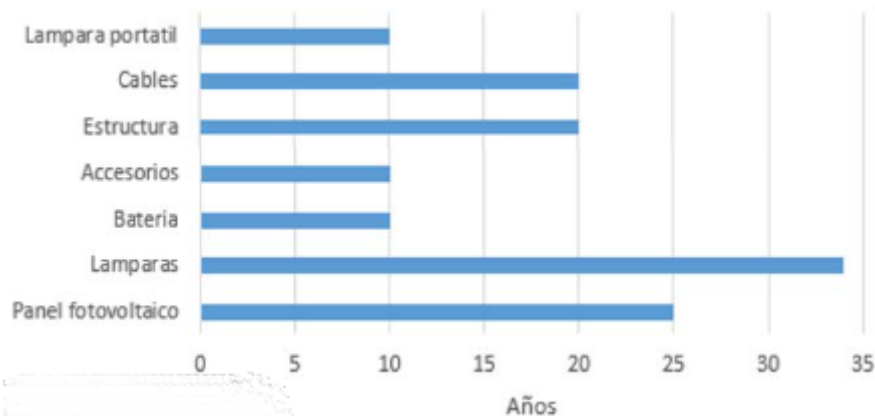


Ilustración 34. Vida útil componentes 3G-SFA (Fernández Fuentes, 2017)

Cabe destacar que, al cabo de 10 años, hay que considerar una nueva inversión para reponer los componentes que han agotado su vida útil (lámpara portátil, accesorios y batería). Este cambio habilita el funcionamiento del sistema otros 10 años. Además, con

²³ Estudio realizado en agosto de 2017 bajo un proyecto llevado a cabo en Bolivia.

el modelo de “Energía como Servicio” (ver capítulo de Modelos de negocio) el pago periódico cubre la reposición de los componentes al cabo de su vida útil.

Sin embargo, la rápida evolución de la tecnología permite argumentar que dentro de 10 años las baterías y los sistemas de tercera generación habrán cambiado, de manera que existan nuevos equipos que proporcionen las mismas prestaciones pero con características más avanzadas, por lo que la rehabilitación de un sistema SFA3G con la tecnología actual puede que no sea la mejor opción.

Peso y tamaño

El uso de baterías de ferrofosfato de litio (LFP) en los SFA3G supone las siguientes ventajas en referencia a su peso y tamaño:

- El peso es menor para igual energía nominal. Tal y como se ha visto previamente, el peso de las baterías LFP puede llegar a ser 6 veces inferior.
- Dada diferencia en sus eficiencias, la batería LFP proporciona mayor energía nominal para la misma energía disponible, lo que influye en su tamaño.

Instalación

Dadas las diferencias tecnológicas entre ambos equipos, los pasos operativos a seguir para instalar y operar cada sistema son diferentes. En el caso de los sistemas de segunda generación, se requiere de operarios técnicos capacitados para la instalación, mientras que en los de tercera generación puede ser el mismo usuario, con la debida capacitación, quien lo instale. Este cambio se debe principalmente a que los sistemas de 3G vienen preparados como kits de bajo peso, con cables y conectores de fácil conexión (plug and play). Durante la capacitación del usuario en el momento de entregarle el sistema se incluyen instrucciones específicas de como instalarlos adecuadamente. Y aunque posteriormente se lleve a cabo una supervisión de la instalación por técnico especializado, estos nuevos equipos permiten reducir la participación de técnicos especializados tanto en la instalación como en el mantenimiento de los equipos (dada una vida útil superior de las baterías y las lámparas y una menor tasa de fallos) (Smart Villages, 2017).

Operación

La tasa de fallos durante la vida útil de los SFA3G es muy inferior a la de los SFA2G. Hay diversas razones para ello. Por una parte, la microelectrónica integrada tiene mayor calidad y menor tasa de fallos que la de componentes individuales conectados. Y, por otro lado, la lógica de “enchufar y funcionar” (plug&play) es mucho más fiable y con menos posibilidades de manipulación errónea que el conexionado manual que depende mucho de la habilidad del técnico.

Esta menor tasa de fallos redunda en un menor número de visitas para reparación, y, por tanto, en un menor coste de operación y una mayor satisfacción para el cliente.

3.4. Mejoras en los componentes de los SFA

Los avances tecnológicos y el uso de nuevos materiales están impulsando innovaciones en los distintos componentes de los sistemas fotovoltaicos aislados, que consiguen que estos últimos sean más eficientes. Estos avances, aún en etapa de investigación, marcan la tendencia de lo que puede ser la evolución futura. A continuación, se describen mejoras para algunos de los componentes.

Paneles solares

Un gran impulso en los paneles solares se ha logrado recientemente con el uso de perovskita, una alternativa a las células solares de silicio tradicionales que se presenta interesante debido a su alta eficiencia energética y bajo coste. Son un tipo de célula solar de película delgada hecha de una clase de materiales artificiales llamados perovskitas. Este material consta de carbonato de calcio, titanio, oxígeno y estroncio. Las principales ventajas de las células solares de perovskita frente a las tradicionales de silicio son las siguientes:

- Mayor eficiencia

Las células solares de perovskita (PVSC) han destacado por su notable eficiencia en convertir la energía solar. Los investigadores esperan que las células solares de perovskita puedan **superar los límites de eficiencia de los paneles tradicionales** una vez que se haya completado su desarrollo de laboratorio.

- Menor coste

El material sintético en que se basan las PVSC puede producirse a bajo coste. Por consiguiente, su fabricación es altamente escalable y los costes de producción tienen el potencial de ser muy bajos en comparación con otras tecnologías de placas solares. Los costes de producción más bajos se traducen en precios más bajos para los consumidores que buscan utilizar la energía solar.

- Más flexibles, ligeros y semitransparentes

Desde una perspectiva de diseño, esta característica hace que sean muy **atractivas**, ya que cuentan con un perfil mucho más bajo que los paneles solares de silicio tradicionales y se pueden incorporar en otras partes de edificios además del tejado.

Sin embargo, dos de los principales desafíos para su desarrollo son su estabilidad a largo plazo y la toxicidad de sus componentes (una sustancia tóxica llamada PbI se produce cuando la perovskita se descompone). Por consiguiente, calidad intrínseca de la película de perovskita es fundamental para determinar la eficiencia y la estabilidad alcanzables de los PVSC (Cambio Energético, 2021).

Baterías

En la última década se ha investigado mucho sobre sistemas de conversión y almacenamiento de energía, debido en gran medida a la actual tendencia que existe en el mundo sobre la descarbonización. Existen dos tendencias futuras que parecen prometedoras: las baterías de sodio y las baterías en estado sólido.

Por un lado, las baterías de ion sodio se presentan como una alternativa muy atractiva frente al litio, presentando las siguientes ventajas:

- El sodio es barato, abundante, más sostenible que el litio y tiene mayor disponibilidad, es decir, es mucho más fácil de conseguir. Concretamente, es el sexto material más abundante del planeta. Esta es una importante ventaja, ya que permitiría abaratar los costes de las baterías significativamente.
- Funcionan en un rango de temperaturas más amplio y son más eficientes en condiciones de frío. A -20 grados conservan un 90% de la capacidad nominal. Además, se cargan más rápido sin perjudicar el rendimiento de la batería.
- Son más seguras, dado que no son inflamables.

Sin embargo, su densidad energética es menor si la comparamos con la de las baterías de litio. Una de las claves para conseguir aumentar su densidad energética es mezclar iones de sodio y de litio, lo que se espera que permita aumentar la autonomía de estas baterías (Gutiérrez, 2023).

Se estima que para 2025 la densidad energética de las baterías de sodio será similar a las de LFP. Además, se prevé que su capacidad de producción aumente significativamente, en parte dado que se benefician de los mismos procesos de producción que las de litio, lo que abarata las inversiones para su despliegue. Para 2025 se habrán instalado 10GWh en todo el mundo aproximadamente (Callejo, 2023).

Por otro lado, tal y como se ha mencionado previamente, el desarrollo de nuevas tecnologías para la fabricación de baterías apunta también hacia el uso del electrolito sólido, que puede ofrecer importantes ventajas frente a las baterías de iones de litio que utilizan una solución de electrolito líquido. Se llama electrolito sólido a los conductores iónicos sólidos que pueden usarse en celdas electroquímicas. Pueden adoptar la forma de cerámica, vidrio, sulfatos o polímeros sólidos.

Las baterías de electrolito sólido han demostrado ser más seguras y de mayor rendimiento que las de electrolito líquido. La mayoría de los estudios se están llevando a cabo para su uso en coches eléctricos, debido a la necesidad de aumentar la autonomía de los mismo para poder reemplazar en un futuro cercano a los coches con motor de combustión interna. Dado que el electrolito sólido ocupa menos espacio que el líquido, se ha demostrado que las baterías de electrolito sólido pueden proporcionar entre 2-10 veces la misma densidad de energía que las baterías del mismo tamaño de electrolito líquido (Diario Motor, 2023).

3.5. Nivel de irradiación. Energía disponible

El nivel de irradiación es uno de los factores más importantes que influyen en el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos aislados. La irradiación se refiere a la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre en un área determinada durante un periodo de tiempo dado, y afecta directamente la cantidad de energía solar que un panel fotovoltaico es capaz de generar. Se mide en Wh/m² o J/m².

Cuando un sistema fotovoltaico aislado se encuentra en un área con un nivel bajo de irradiación, la cantidad de energía solar que llega a los paneles fotovoltaicos es menor, lo que resulta en una menor producción de energía eléctrica. Por otro lado, en áreas con un nivel alto de irradiación, los paneles fotovoltaicos son capaces de generar más energía eléctrica, lo que permite que el sistema funcione de manera más eficiente.

Este potencial es diferente para cada región del mundo, y su valor debe estudiarse de forma independiente. Hay distintas organizaciones que registran estos datos, entre ellos desatacan los proporcionados por el Banco Mundial bajo el programa ESMAP (Energy

Sector Management Assistance Program). En su página web se puede observar tanto el potencial fotovoltaico como la irradiación directa, horizontal y global. El potencial fotovoltaico, medido en kWh/kWp, permite conocer el tiempo de energía disponible para una potencia concreta, mientras que la irradiación se mide en kWh/m², y permite conocer la energía que se generará por m² de panel instalado en un tiempo determinado.

El uso de un dato u otro dependerá del objetivo final que se quiera conseguir con ese valor. Por ejemplo, si se requiere saber el tamaño en m² de un panel solar para que cumpla con una demanda de energía dada, se empleará el valor de irradiación solar.

En términos generales, se considera que el valor de potencial fotovoltaico permite conocer de forma sencilla la energía que proporcionará un panel de ciertos vatios pico (Wp) una vez instalado. Sin embargo, para poder realizar el dimensionamiento será necesario conocer el valor de la irradiación global.

Las siguientes ilustraciones muestran el potencial fotovoltaico y la irradiación directa y horizontal media anual del mundo:

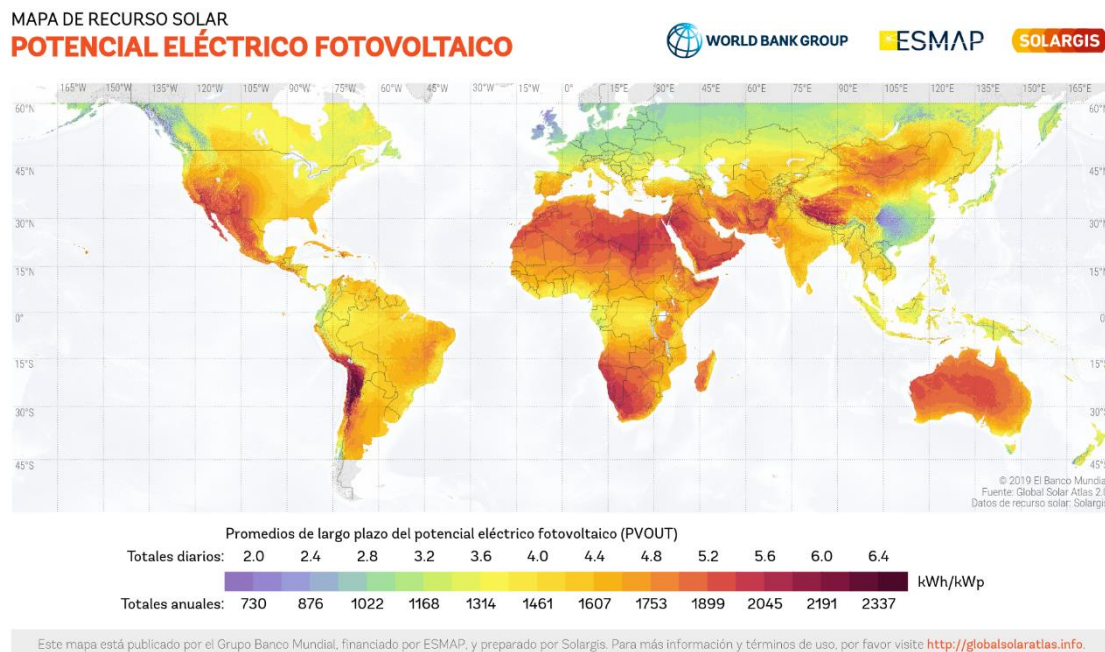


Ilustración 35. Potencial eléctrico fotovoltaico global (World Bank Group, 2023)²⁴

²⁴ El mapa está realizado con datos actualizados hasta el año 2018.

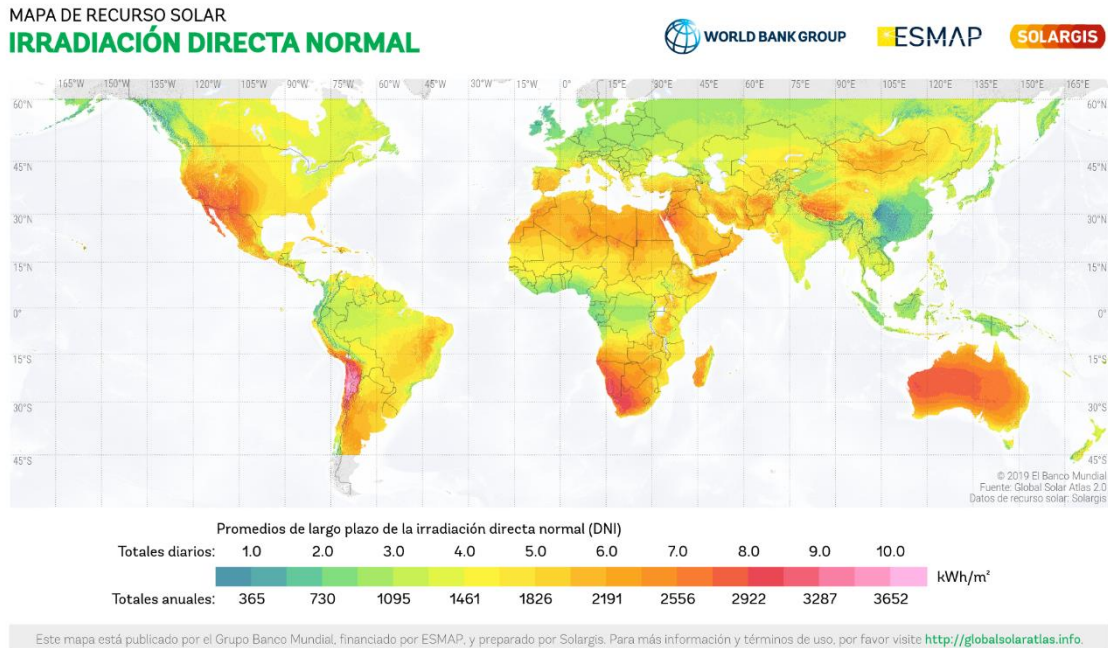


Ilustración 36. Irradiación directa normal (World Bank Group, 2023)²⁵

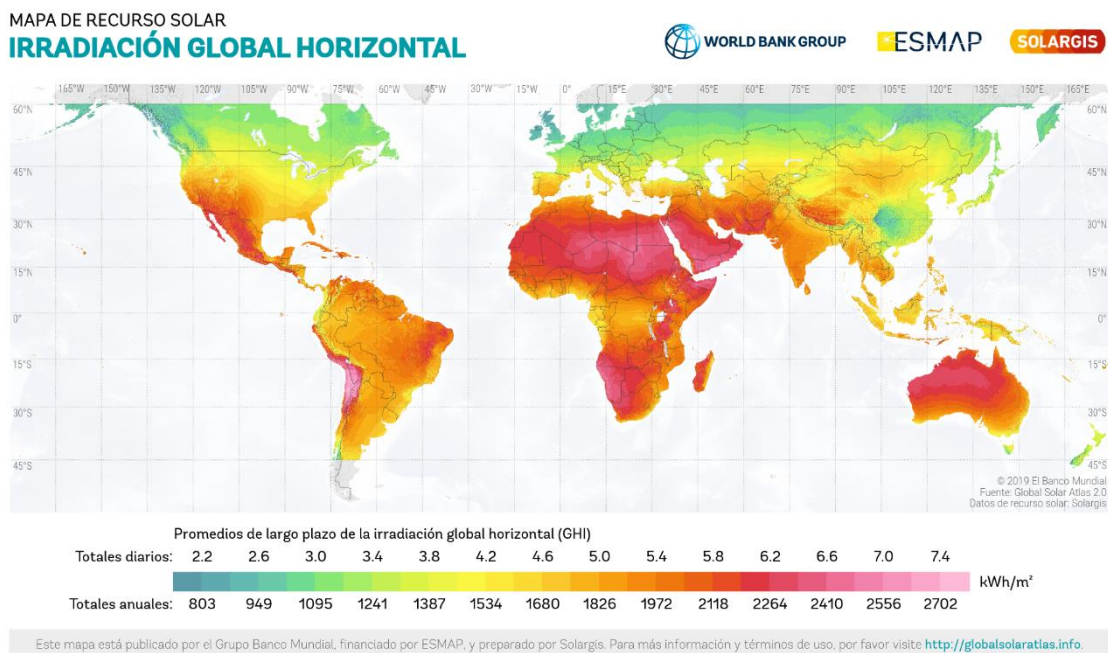


Ilustración 37. Irradiación global horizontal (World Bank Group, 2023)²⁶

Se puede observar que los lugares más cercanos al ecuador, especialmente en América Latina, África y Asia, tienen un mayor potencial fotovoltaico, lo que significa que son ideales para la instalación de paneles fotovoltaicos. Por otro lado, los lugares más alejados del ecuador, como los países nórdicos y parte de Rusia, tienen un potencial más bajo y, por lo tanto, se requerirían sistemas fotovoltaicos de mayor tamaño para obtener la misma producción de energía.

²⁵ Idem.

²⁶ Idem.

Sin embargo, tal y como se ha mencionado antes, para la instalación y dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos, cada ubicación debe ser estudiada de forma independiente. Esto se debe a que existen grandes diferencias entre las diferentes partes del mundo y dentro de un mismo país, y por consiguiente no se puede considerar el valor medio de un país como el característico de cada una de sus regiones. Tampoco puede considerarse el valor medio anual como el representativo de una región, dado que, de hacerlo, se estarían suponiendo potenciales que tal vez un mes determinado no llegarían a alcanzarse. Si los paneles fotovoltaicos se dimensionaran en base a ese valor, habría meses donde no se podría cumplir con toda la demanda requerida por los equipos. Consecuentemente, deberá considerarse para el dimensionamiento el valor menos favorable de todo el año, es decir, el del mes que presente un valor inferior.

Dado que el ejemplo de dimensionamiento de SFA se realizará para una ubicación en una región de Panamá, a continuación, se muestra el mapa de potencial fotovoltaico del país.

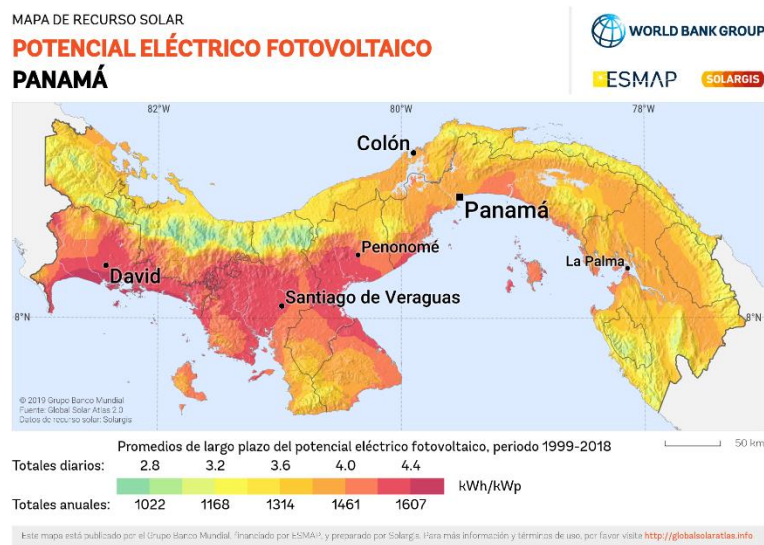


Ilustración 38. Potencial Fotovoltaico Panamá (World Bank Group, 2023)

3.6. Dimensionamiento de SFAs

A continuación, se va a realizar un ejemplo de dimensionamiento de los sistemas y una propuesta de equipos consumidores que podrían emplearse.

Antes de realizar el dimensionado, es necesario conocer la demanda que va a ser necesario satisfacer. Para ello se ha desarrollado el subpartado *Propuesta de equipos*, donde se ha calculado el consumo de un conjunto de electrodomésticos que darían un acceso energético adecuado a un hogar.

Posteriormente, en los subpartados *Dimensionamiento manual convencional* (3.4.2.) y *variaciones* (3.4.3.), se realiza un cálculo manual del sistema necesario para satisfacer dicha demanda.

Convencionalmente, se asume que todas las cargas son suministradas por la batería (tanto las diurnas como las nocturnas), de modo que la eficiencia de la batería se tiene en cuenta para todas las cargas al determinar el tamaño del panel solar requerido para satisfacer la demanda diaria de energía. Sin embargo, parte de la energía que requiere la carga será

suministrada directamente por los paneles durante el día. Para determinar qué parte de la demanda se satisface de este modo, se requiere un análisis exhaustivo por intervalos en el cual se compare el perfil de potencia solar disponible y el consumo horario. No obstante, ambos perfiles pueden variar de un día a otro.

Para el dimensionamiento de SFAs domésticos en corriente continua se recomienda que la batería se dimensione de modo que pueda satisfacer toda la demanda diaria. De esta forma hay un sobredimensionamiento de la batería que permite alimentar el consumo cuando haya días nublados (VeraSol, 2023).

Además del dimensionado convencional de la batería abasteciendo el total de la carga, se ha dedicado un subapartado al dimensionado de los sistemas considerando ciertas variaciones, como son el diseño de la batería cuando atiende únicamente a la demanda nocturna y la posibilidad de dotar el sistema con 1,5 días de autonomía previendo los días nublados consecutivos.

Finalmente, se procede a validar la calidad de servicio del dimensionado mediante el uso de la herramienta PVGIS.

3.6.1. Propuesta de equipos para el bloque de consumo

En este apartado se realiza una propuesta de selección de equipos para que un hogar pueda alcanzar un nivel de acceso básico. La selección se realizará respetando lo que la IEA define como nivel básico de acceso a la energía, descrito en el *Capítulo 2. Niveles de Acceso* del presente documento.

Como se ha mencionado en otras secciones, el desarrollo tecnológico está permitiendo que cada vez los usuarios pueden tener un nivel de servicio mayor para un sistema de igual potencia. Esto se debe a que cada vez aumenta la eficiencia energética de los equipos, lo que permite que sus consumos sean menores y se logren grandes ventajas para el consumidor final.

Actualmente existen diferentes organizaciones y empresas que han desarrollado equipos que presentan bajos consumos, y que, por consiguiente, son adecuados para emplear en regiones de la última milla.

Se han recopilado distintos modelos de electrodomésticos cuyas características se han recogido en un Excel en forma de catálogo. La hoja de cálculo permite realizar una selección de los modelos presentados, así como indicar el tiempo de uso de cada uno de los equipos, y da como resultado el consumo total diario y horario de la propuesta seleccionada. Es importante diferenciar entre las horas de consumo diurnas y nocturnas, por si se quiere dimensionar la batería para uso nocturno y los paneles para cargar la batería y atender el uso diurno (se ha considerado como consumo diurno aquel que se realiza desde las 6h hasta las 20h). Cabe destacar que todos los equipos presentados en la hoja de cálculo pueden funcionar a 12Vcc.

Además, en el Excel se ha incluido el dimensionado manual que se muestra en este capítulo, mostrando los resultados para el consumo seleccionado.

Las principales organizaciones y empresas consultadas para la realización del catálogo han sido:

- VeraSol²⁷, como verificador y certificador de características de equipos consumidores.
- Zimpertec²⁸, como fabricante de equipos consumidores.
- Fosera²⁹, como fabricante de equipos consumidores.
- Phocos³⁰, como fabricante de equipos consumidores.

El Anexo II incluye capturas de este Excel, donde se puede observar su funcionamiento.

ILUMINACIÓN

Tal y como establece la IEA, se deben seleccionar focos que proporcionen iluminación durante un mínimo de 5 horas. En este caso las 5 horas serán horas nocturnas o aquellas en que no hay mucha luz natural, dado que será en ese momento cuando la iluminación sea necesaria. El tipo de bombillas seleccionadas serán LED, dado su menor consumo para un mismo nivel de iluminación comparado con otras bombillas presentes en el mercado. Se seleccionarán focos que proporcionen como mínimo 100 lúmenes por Watio. Pese a que en función del espacio a iluminar se pueda requerir una potencia lumínica u otra, para simplificar el diseño de la iluminación se ha decidido emplear para el dimensionamiento 3 LEDs (de 0,78W cada uno) que proporcionen cada uno 110 lúmenes. La colocación y distribución de cada uno de estos LEDs será acordada con cada usuario, en función de los requerimientos del hogar. Considerar que en las viviendas de la última milla el número de habitaciones o ambientes diferenciados es muy reducido.

Además, la hoja de cálculo permite insertar un factor de simultaneidad, el cual se ha establecido en 0,75 para el cálculo.

El modelo de LED seleccionado es el Fosera Ceiling Lamp 100³¹ con eficiencia lumínica de 145lm por Watio. Se trata de una iluminación muy eficiente si se compara con las características estándar presentadas en el *Capítulo 2. Niveles de Acceso*. Es una luz de techo, que presenta una temperatura de color de 5000K. Este parámetro indica la impresión de color generada por una luz blanca, describiendo si el aspecto será “cálido” o “frío”. Una temperatura de 5000K representa una luz neutra, adecuada para su uso en comunidades rurales aisladas. A continuación, se muestra una imagen del foco seleccionado:

²⁷ <https://data.verasol.org/>

²⁸ <https://www.zimpertec.com/>

²⁹ <https://fosera.com/>

³⁰ <https://www.phocos.com/es/>

³¹ <https://fosera.com/products/appliances/solar-lamps>



Ilustración 39. Fosera Ceiling Lamp 100 (Fuente : Fosera)

FRIGORÍFICO

Dado que el frigorífico es el equipo que más energía consume, se evaluará el consumo diario contando con este equipo y sin él.

El modelo seleccionado es el Phocos FR230-B³². Tiene un consumo diario de 193Wh. Se trata de un refrigerador con una capacidad de 238 litros y un peso de 80kg.

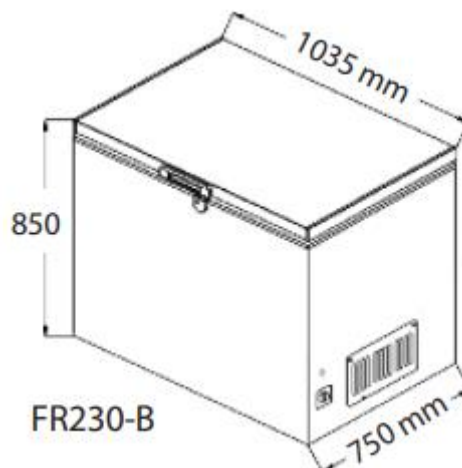


Ilustración 40. Esquema frigorífico Phocos FR230-B (Fuente: Phocos)

TV

El modelo de TV seleccionado ha sido el Zimpertec TV-DVB-T2/S2-19³³. Es un equipo TV de 19 pulgadas que presenta una potencia en funcionamiento de 10W. A continuación, se puede observar una imagen del equipo:

³² https://www.phocos.com/wp-content/uploads/2019/11/FR-B-Series_spanish-datasheet_2020-12-15.pdf

³³ <https://www.zimpertec.com/SHS-Components/Solar-Home-Accessories/>



Ilustración 41. TV (Fuente: Zimpertec)

La TV estará funcionando durante 4 horas al día, 2 diurnas y 2 nocturnas.

VENTILADOR

El modelo de ventilador seleccionado es el Metropolitan MEUC12DCT³⁴, que se ha encontrado en el catálogo de VeraSol. Es un ventilador de mesa que presenta un consumo de 8W y un caudal de aire de 30,72 m³/min. Su eficiencia energética es de 3,19 m³/min/W. El ventilador funcionará durante 6 horas, en horario diurno dado que se ha considerado que comprende las horas en las que puede hacer más calor.

CARGADOR DE TELÉFONO MÓVIL

El sistema debe tener al menos dos puestos USB para poder cargar teléfonos móviles u otros equipos de bajo consumo. Este dispositivo requiere de media 5W para cargarse, y debe estar enchufado durante 2h. Se supondrán 2 cargas al día, que se realizarán por la noche.

Adicionalmente, el usuario podría conectar otros equipos como radios o tabletas. Sin embargo, para el presente dimensionamiento no se ha considerado la conexión de estos equipos. Esto se debe a que la radio, pese a ser uno de los medios de información más empleados en las comunidades rurales, a medida que estas mismas puedan acceder a equipos como TV o teléfonos móviles, su uso estará en declive, como sucede en los países desarrollados. Por otro lado, la carga de una tableta sencilla requiere de 10W durante 2h aproximadamente, por lo que se considera que para el dimensionado propuesto, algún día se podría sustituir la carga de los dos teléfonos por la de la tableta en caso de que fuese necesario.

La siguiente tabla muestra a modo de resumen el consumo total de los equipos y horas de funcionamiento seleccionadas:

Selección equipos							
Equipo	Núm. LEDs / Fact. sim	Pot./ LED (W)	Potencia (W)	Tiempo (h)	Consumo diurno (Wh)	Consumo nocturno (Wh)	Consumo diario total (Wh)
Ilum. LED	3 / 0,75	0,78	1,755	5	0	8,775	8,775

³⁴ <https://data.verasol.org/products/fan/metropolitan82?viewall=true>

Frigorífico	-	-	8,042	24	112,6	80,4	193
Ventilador	-	-	8	6	48	0	48
Cargador móvil	-	-	5	4	0	20	20
TV	-	-	10	4	20	20	40
Total					194,1	135,7	329,8
Total SIN frigorífico					81,51	55,3	136,8

Tabla 8. Consumo equipos seleccionados para dimensionamiento (Elaboración propia)

Los siguientes gráficos muestran el consumo horario total a lo largo del día, así como el que corresponde a cada uno de los equipos:

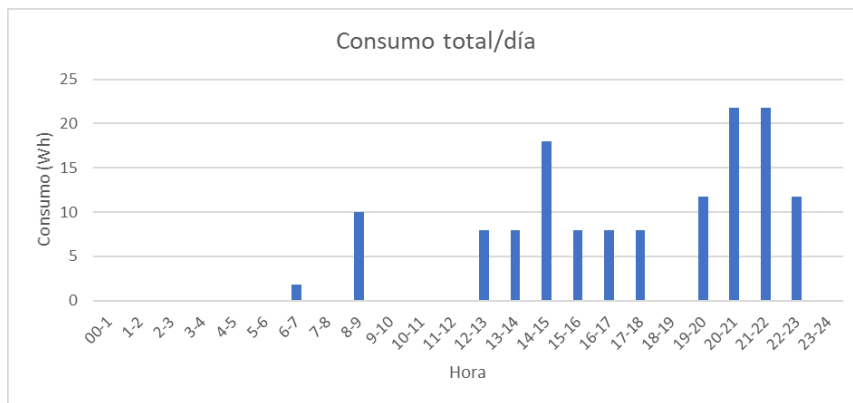


Ilustración 42. Consumo horario demanda SIN frigorífico (Elaboración propia)

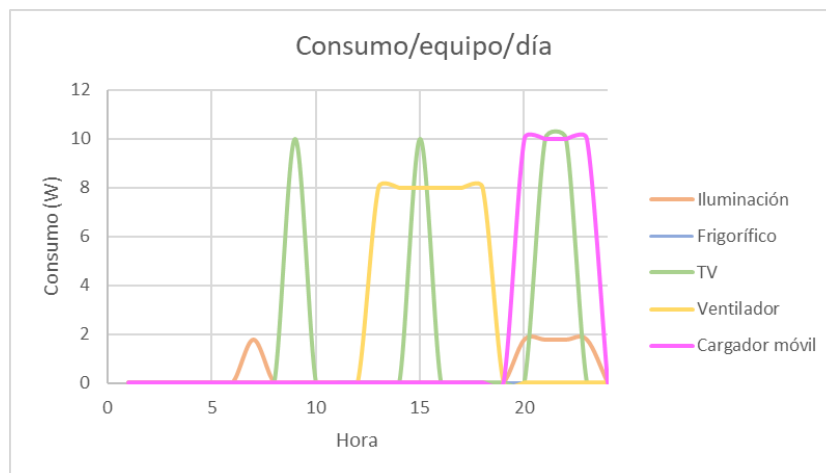


Ilustración 43. Consumo por equipo demanda SIN frigorífico (Elaboración propia)

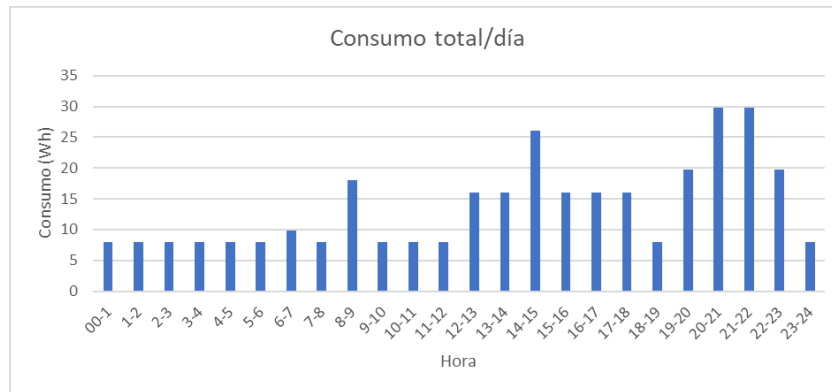


Ilustración 44. Consumo horario demanda con frigorífico (Elaboración propia)

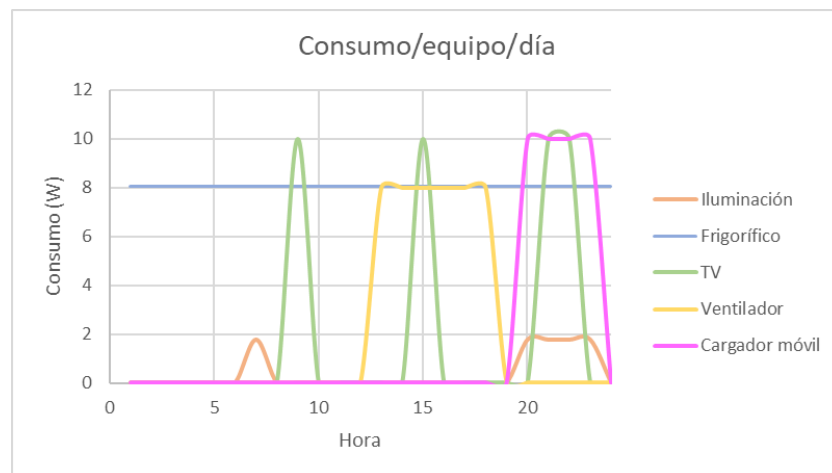


Ilustración 45. Consumo por equipo demanda con frigorífico (Elaboración propia)

3.6.2. Dimensionado manual convencional

Para poder realizar el dimensionado es necesario establecer la región concreta donde se van a instalar los equipos. En este caso, los equipos se instalarán en la península Valiente, ubicada la comarca indígena de Ngäbe-Buglé, en Panamá. En concreto, los datos de irradiación se han obtenido para el corregimiento de Kusapín, ubicado en esta península.



Ilustración 46. Península Valiente³⁵

³⁵ https://es.wikipedia.org/wiki/Pen%C3%ADnsula_Valiente

Se dimensionará el sistema para que cuente con 1 día de autonomía, dado que se supondrá que en los días que no haya sol, habrá igualmente la radiación suficiente para que los paneles puedan cargar las baterías, y, por consiguiente, se generará energía para cubrir la demanda diaria.

Tal y como se ha mencionado previamente, se diseña el sistema para cubrir la demanda con y sin frigorífico, empezando por la que no lo incluye.

Como se puede observar en la Tabla 4, esta demanda es aproximadamente de **136,8Wh**, repartidos en 81,51Wh durante el día y 55,3Wh durante la noche. Tal y como se ha explicado previamente, inicialmente se dimensionará la batería para que pueda satisfacer el total de la demanda.

Considerando las pérdidas del sistema, la energía diaria a entregar a la batería (E_{bat}) debe ser superior a la energía consumida (E_c), y viene dada por la siguiente ecuación:

$$E_{bat} = \frac{E_c}{R}$$

Donde R es el rendimiento global: $R = (1 - K_B - K_V) * (1 - K_A * \frac{N}{P_d})$

K_b = coeficiente de pérdidas por rendimiento de las baterías: representa la fracción de energía que la batería no devuelve con respecto a la absorbida procedente de los paneles. Suele tomar los siguientes valores:

0,05 para sistemas donde no se producen descargas intensas

0,1 en sistemas donde sí se producen descargas intensas

Para el presente trabajo se tomará **kb = 0,05** (BIRTIh, s.f.).

K_a = coeficiente de pérdidas por auto descarga diaria de las baterías: como se ha comentado previamente, las baterías de litio presentan la ventaja de tener una autodescarga muy baja. En concreto el valor suele ser del 1-2% mensual. Se tomará el dato más desfavorable, que trasladado a autodescarga diaria supondría un valor de **ka = 0,0007** (Lovesharing, 2023).

K_v = coeficiente de pérdidas varias: efecto Joule, etc.: tiene en cuenta el rendimiento global de todo el sistema de consumo. Suele adoptar valores entre 0,05 y 0,15. Para el trabajo se tomará una estimación de **kv = 0,1** (BIRTIh, s.f.).

N = número de días de autonomía de la instalación: se ha decidido que el sistema contará con 1 día de autonomía (**N = 1**).

P_d = profundidad de descarga máxima deseada para no disminuir la vida útil de las baterías. Las baterías de litio presentan valores altos de profundidad de descarga. Para el dimensionamiento se tomará **Pd = 90%**.

Estos valores permiten obtener el siguiente rendimiento global:

$$R = (1 - 0,05 - 0,1) * \left(1 - 0,0007 * \frac{1}{0,9}\right) = 0,8493$$

Por consiguiente, el rendimiento global del sistema será aproximadamente del **85%**. Por lo tanto:

$$E_{bat} = \frac{137}{0,85} = 161 \text{ Wh/día}$$

Esta es la energía que debe suministrarse diariamente al sistema, pero a ello hay que sumarle las pérdidas en el regulador de carga. Estas pérdidas se aproximarán en un 5%³⁶. Por consiguiente, la energía generada (E_g) por los paneles deberá ser de:

$$E_g = \frac{E_{bat}}{0,95} = \frac{161}{0,95} = 169,5 \text{ Wh/día}$$

Se tomará el valor aproximado de 170Wh/día.

El otro dato que debemos conocer para poder dimensionar el sistema es la radiación solar de la región en cuestión. Este dato nos permite conocer las “Horas Sol Pico” (HSP), asociadas al punto y condiciones de instalación. Estas horas corresponden al número de horas en que debería haber una radiación de 1000W/m².

Por ejemplo, la radiación solar media diaria en el mes más desfavorable (noviembre) en la región de Kusapín es de 3360Wh/m²³⁷. Este dato equivale a una radiación de 1000W/m² durante 3,36 horas, de manera que se requieren 3,36 HSP para generar la energía de ejemplo.

Este dato es importante ya que se entiende por potencia pico de un panel (W_p), la energía que es capaz de generar durante una hora, sometido condiciones estándar de ensayo (radiación constante de 1000W/m², temperatura de 25°C y masa de aire de 1,5). Su promedio será ligeramente inferior en condiciones reales de funcionamiento, debido a la posible suciedad del módulo, etc. Por ello, para obtener la energía diaria que los paneles generan por cada vatio instalado (E_p), se puede modificar este HSP con un factor de rendimiento del 90%, siendo:

$$E_p = 0,9 * HSP$$

La potencia pico del panel a instalar se obtendrá dividiendo la energía total que debe generar (E_g), entre la energía que genera por cada vatio instalado (E_p):

$$P_p = \frac{E_g}{E_p} = \frac{170 \text{ Wh/día}}{0,9 * 3,36 \text{ h/día}} = 56,1 \text{ Wp}$$

La potencia pico instalada necesaria será aproximadamente de **56Wp**.

A continuación, se debe dimensionar el bloque acumulador, formado principalmente por la batería. Tal y como se ha comentado, una hipótesis convencional y conservadora bastante habitual es suponer que la batería aporta la energía diaria total tanto diurna como nocturna. Bajo dicha hipótesis, la capacidad útil de la misma viene determinada por la expresión:

$$C_u = E_{bat} * N$$

$$C_u = 161 * 1 = 137,65 \text{ Wh}$$

La capacidad nominal será superior, ya que se tendrá en cuenta la profundidad de descarga de la batería, de modo que:

$$C_n = \frac{C_u}{P_d} = \frac{161}{0,9} = 178,9 \text{ Wh}$$

³⁶ Según los criterios establecidos por VeraSol en la guía para el diseño de sistemas fotovoltaicos (VeraSol, 2023).

³⁷ Los datos han sido extraídos de: <https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>

Puesto que comercialmente los valores de capacidad de una batería se expresan en Ah, el resultado anterior se dividirá entre la tensión nominal del sistema para convertirlo a tal unidad:

$$Cn_{ah} = \frac{178,9 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 14,9 \text{ Ah}$$

Como se puede observar, una capacidad de **14,9 Ah**, sería suficiente para cubrir la demanda requerida.

A continuación, se repetirán los cálculos para el dimensionamiento del sistema que cuenta con frigorífico. La demanda diaria en este caso es de **329,8 Wh** aproximadamente y se dimensionará para que el sistema cuente también con 1 día de autonomía. En este caso:

$$E_{bat} = \frac{329,8}{0,85} = 388,3 \text{ Wh/día}$$

$$E_g = \frac{E_{bat}}{0,95} = \frac{388,3}{0,95} = 408,7 \text{ Wh/día}$$

$$P_p = \frac{E_g}{E_p} = \frac{408,7 \text{ Wh/día}}{0,9 * 3,36 \text{ h/día}} = \mathbf{135,2 \text{ Wp}}$$

$$C_u = 388,3 * 1 = 364,7 \text{ Wh}$$

$$C_n = \frac{C_u}{P_d} = \frac{364,7}{0,9} = 405,2 \text{ Wh}$$

$$Cn_{ah} = \frac{405,2 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = \mathbf{33,8 \text{ Ah}}$$

En este caso, sería necesario como mínimo un panel de 135,2Wp y una batería de 36Ah.

3.6.3. Variaciones respecto al dimensionado convencional

VARIACIÓN 1 – BATERÍA SATISFACE SÓLO LA DEMANDA NOCTURNA

A continuación, se dimensionará el sistema para que la batería cumpla únicamente con la demanda nocturna. En este caso, el sistema debe diseñarse para que la batería quede lo suficientemente cargada y pueda suministrar los 49Wh necesarios durante la noche, momento en el que el panel no podrá generar energía. El panel solar debe producir la energía que se va a consumir durante el día y cargar la batería para que pueda satisfacerse el consumo nocturno. Por ello, la potencia del panel no cambiará en este caso.

Se empezará de nuevo por la demanda que no cuenta con frigorífico. La energía que habrá que suministrar a la batería será aquella que deba ser consumida durante la noche. Del mismo modo que en el dimensionamiento del panel, se considerará el rendimiento global del sistema. Por consiguiente, la energía a suministrar a la batería, así como su capacidad será:

$$E_{bat} = \frac{E_{noct}}{R} = \frac{55,3}{0,85} = 65,1 \text{ Wh/día}$$

$$C_u = 65,1 * 1 = 65,1 \text{ Wh}$$

$$C_n = \frac{C_u}{P_d} = \frac{65,1}{0,9} = 72,3 \text{ Wh}$$

$$Cn_{ah} = \frac{72,3 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = \mathbf{6 \text{ Ah}}$$

Para la demanda que cuenta con frigorífico:

$$E_{bat} = \frac{E_{noct}}{R} = \frac{135,7}{0,85} = 159,8 \text{ Wh/día}$$

$$C_u = 159,8 * 1 = 159,8 \text{ Wh}$$

$$C_n = \frac{C_u}{P_d} = \frac{159,8}{0,9} = 177,5 \text{ Wh}$$

$$Cn_{ah} = \frac{177,5 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = \mathbf{14,8 \text{ Ah}}$$

VARIACIÓN 2 – 1,5 DÍAS DE AUTONOMÍA

A continuación, se realizará un nuevo dimensionamiento del sistema para que cuente con 2 días de autonomía (de nuevo, primero se realizan los cálculos para la primera demanda y después para la que cuenta con frigorífico).

En este caso, el nuevo rendimiento global del sistema vendrá dado por la ecuación:

$$R = (1 - K_B - K_V) * \left(1 - K_A * \frac{N}{Pd}\right) = (1 - 0,05 - 0,1) * \left(1 - 0,0007 * \frac{1,5}{0,9}\right) = 0,849$$

Si se suceden dos días sin sol y se debe utilizar la energía almacenada en la batería, posteriormente será necesario recargarla. Se exigirá que esté cargada completamente en un plazo máximo de 4 días. Será necesario recargar la energía que se consume en 2 días:

$$E_{bat} = \frac{Ec}{R} = \frac{137}{0,849} = 161 \text{ Wh/día}$$

$$E_g = \frac{E_{bat}}{0,95} = \frac{161}{0,95} = 169,6 \text{ Wh/día}$$

$$E_{recargar} = 1,5 * 169,6 = 254,4 \text{ Wh}$$

Además, se debe poder satisfacer la demanda de los días durante los cuales se recargará la batería, por consiguiente, la energía total que se tiene que generar es:

$$E_{total} = E_{recargar} + 4 * 169,6 = 932,7 \text{ Wh}$$

La potencia pico del panel a instalar será:

$$P_p = \frac{E_{total}}{E_p * 4} = \frac{932,7 \text{ Wh}}{0,9 * 3,36 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 4 \text{ días}} = 77,1 \text{ Wp}$$

En este caso, contando con los dos días de autonomía, la capacidad útil de la batería será:

$$Cu = E_{bat} * N$$

$$Cu = 161 * 1,5 = 241,6 \text{ Wh}$$

$$Cn = \frac{Cu}{Pd} = \frac{241,6}{0,9} = 268,5 \text{ Wh}$$

$$Cn_{ah} = \frac{268,5 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 22,4 \text{ Ah}$$

A continuación, se presentan las ecuaciones que permiten obtener el dimensionamiento del sistema para satisfacer la demanda mayor:

$$E_{bat} = \frac{Ec}{R} = \frac{329,8}{0,849} = 388,4 \text{ Wh/día}$$

$$E_g = \frac{E_{bat}}{0,95} = \frac{388,4}{0,95} = 408,9 \text{ Wh/día}$$

$$E_{recargar} = 1,5 * 408,9 = 613,3 \text{ Wh}$$

$$E_{total} = E_{recargar} + 4 * 408,9 = 2248,8 \text{ Wh}$$

$$P_p = \frac{E_{total}}{E_p * 4} = \frac{2248,8 \text{ Wh}}{0,9 * 3,36 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 4 \text{ días}} = 185,9 \text{ Wp}$$

$$Cu = E_{bat} * N$$

$$Cu = 388,4 * 1,5 = 582,6 \text{ Wh}$$

$$Cn = \frac{Cu}{Pd} = \frac{582,6}{0,9} = 647,4 \text{ Wh}$$

$$Cn_{ah} = \frac{647,4 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 54 \text{ Ah}$$

3.6.4. Comparación y dimensionado definitivo

La siguiente tabla muestra a modo de resumen las dimensiones obtenidas para cada uno de los casos estudiados (demanda con y sin frigorífico):

Caso	Potencia Panel (Wp)	Capacidad batería (Ah)
Convencional	56	14,1
Batería para consumo nocturno	56	6
1,5 días de autonomía	77,1	22,4

Tabla 9. Variaciones dimensionamiento demanda sin frigorífico (Elaboración propia)

Caso	Potencia Panel (Wp)	Capacidad batería (Ah)
Convencional	135,2	36
Batería para consumo nocturno	135,2	14,8
1,5 días de autonomía	185,9	54

Tabla 10. Variaciones dimensionamiento demanda con frigorífico (Elaboración propia)

Tal y como se puede observar, cuando se realiza la primera variación se obtiene una capacidad de la batería que es significativamente pequeña. Como se ha comentado previamente, puede ser que en algunas ocasiones la insolación sea reducida y el panel no esté alimentando directamente a la carga, por lo que se considera que este dimensionamiento podría no ofrecer el nivel de servicio requerido.

La segunda variación permite, además de dimensionar el sistema considerando que la batería aporta toda la energía diaria, dotar al sistema con 1,5 días de autonomía, lo cuál puede ser útil si se tiene en cuenta que pueden darse días nublados. Esta autonomía permite ofrecer in servicio de mayor calidad para los usuarios.

En la guía de diseño de VeraSol, (VeraSol, 2023), se recomienda que todos los sistemas que incluyan baterías de ión-litio deben contar con un factor de sobredimensionamiento del 10%, de modo que se cubra eficazmente el envejecimiento del módulo solar.

Por este motivo y con el objetivo de contar con energía de reserva por si en alguna ocasión la radiación es inferior a la supuesta, se propone la selección de los siguientes equipos (la selección se ha hecho teniendo en cuenta los estándares de fabricación):

Demanda diaria	Panel solar	Batería	Fabricante
SIN frigorífico (136,8Wh)	120Wp	25Ah	Panel y batería Zimpertec
CON frigorífico (329,8Wh)	240Wp (2 paneles de 120Wp)	50Ah	Panel y batería Zimpertec

Tabla 11. Selección paneles y baterías (Elaboración propia)

Esta selección permite, para la demanda sin frigorífico, cumplir con el objetivo de contar con 1,5 días de autonomía. En el segundo caso, la batería es muy justa para contar con la misma autonomía, sin embargo, al ser los valores próximos, se puede afirmar que el sistema contará con una autonomía próxima a 1,5 días.

El regulador de carga va incorporado en la batería, y es del tipo PWM. Por consiguiente, todo el sistema deberá funcionar a la misma tensión que la de la batería, 12V, y los dos paneles de 120Wp deberán conectarse en paralelo.

Otra solución posible, en el caso de la demanda que cuenta con frigorífico, puede ser poner en paralelo dos sistemas de 120Wp 25 Ah. Esto permite al proveedor del servicio gestionar sólo un tipo de SFA y poder escalar el equipo de acuerdo cómo evolucione la demanda.

3.6.5. Validación de la calidad del dimensionado mediante PVGIS

PVGIS es una herramienta en línea desarrollada por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea³⁸. Se utiliza para obtener información sobre radiación solar y el rendimiento de sistemas fotovoltaicos. Se puede usar PVGIS para calcular cuanta energía se puede obtener de diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos en casi cualquier lugar del mundo. La herramienta utiliza datos geográficos y climáticos para calcular la radiación solar incidente, la producción estimada de energía y otros parámetros relacionados. PVGIS es útil para planificar instalaciones solares, realizar análisis de viabilidad, estimar la producción de energía y comparar diferentes tecnologías fotovoltaicas.

Dado el potencial de esta herramienta, se ha considerado útil explicar su funcionamiento para que pueda servir como referencia para la validación del diseño de sistemas fotovoltaicos fuera de red. La herramienta permite tratar sistemas tanto on-grid como off-grid, e incorpora bases de datos de radiación solar de casi todo el mundo. Concretamente, la base de datos que emplea para el cálculo del dimensionamiento en Panamá es la proporcionada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), que proporciona datos para el continente americano desde el año 1998 hasta el 2021³⁹.

En el presente trabajo, PVGIS se empleará para evaluar la calidad del servicio ofrecido. Su funcionamiento es sencillo. En primer lugar, se debe seleccionar el tipo de sistema que se desea elegir, en este caso off-grid.

A continuación, se debe introducir la región donde se instalarán los sistemas. Se han introducido las coordenadas pertenecientes a la región de Kusapín (Lat: 9,14; Long: -81,92).

Una vez introducidas, la herramienta selecciona automáticamente la base de datos que se empleará para el cálculo. En este caso, la base empleada es PVGIS-NSRDB. Es la misma base de datos que se ha empleado para obtener la radiación de la región en el dimensionamiento manual del presente trabajo.

El siguiente paso es incluir los datos de los sistemas y de la demanda que se desea satisfacer con ella, de modo que la herramienta nos dirá si son capaces de generar y almacenar la energía requerida en la región seleccionada.

Se realizará el dimensionado para la demanda que no cuenta con frigorífico (136,8Wh). Los datos que se insertarán serán los siguientes:

- Potencia pico instalada (Wp): 120Wp, obtenido del dimensionamiento manual.
- Capacidad de la batería (Wh): 300Wh, obtenido del dimensionamiento manual.

³⁸ https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool_en

³⁹ <https://nsrdb.nrel.gov/data-sets/international-data>

- Límite de descarga de la batería: 10% (es un valor conservador ya que podría llegar a ser más bajo, hasta el 3%).
- Consumo diario (Wh): 136,8Wh.
La herramienta permite introducir como se distribuye este consumo a lo largo de las horas del día. Si no se introduce, la herramienta considera una distribución correspondiente al consumo normal de un hogar, con la mayor parte del mismo durante la tarde/noche.
Dado que para el cálculo del consumo diario y la selección de los equipos se ha desarrollado un Excel que permite observar el consumo por horas, para este ejemplo se han introducido los valores obtenidos en esta hoja Excel.
- Ángulo de inclinación: en el caso de Panamá, el ángulo óptimo de inclinación es de 14° (Jacobson y Jadhav, 2018).
- Ángulo azimutal: se considerará un ángulo de cero, es decir, paneles orientados hacia el sur.

Resultados obtenidos:

Month	E_d	E_I	f_f	f_e
January	136.9	207.2	93.5	0.0
February	136.8	260.8	96.4	0.0
March	136.8	252.7	95.3	0.0
April	136.8	251.2	97.6	0.0
May	136.8	224.8	97.7	0.0
June	136.8	212.4	97.3	0.0
July	136.7	190.5	98.0	0.0
August	136.9	233.6	96.5	0.0
September	136.8	263.1	98.8	0.0
October	136.6	263.1	98.5	0.0
November	136.9	190.4	91.2	0.0
December	136.5	185.4	90.9	0.6

Ilustración 47. Resultados PVGIS módulo 120Wp y batería de 25Ah (Fuente PVGIS)

Donde:

E_d (Wh/día): producción promedio de energía por día. Representa la energía producida por los paneles solares que es utilizada por la carga, no necesariamente de forma directa. Puede haber sido almacenada en la batería y luego utilizada por la carga.

E_I (Wh/día): energía promedio no capturada por día. Representa la energía producida por el sistema que se pierde porque la carga es menor que la producción de los paneles solares. Esta energía no puede ser almacenada en la batería, o si se almacena, no puede ser utilizada por las cargas ya que estas ya están cubiertas.

f_f (%): porcentaje de días en los cuáles la batería se llenó.

f_e (%): porcentaje de días en los cuáles la batería se vació.

Además, la herramienta proporciona como resultado el valor del “promedio de energía faltante”, el cual representa la demanda que no puede ser satisfecha ni por los paneles solares ni por la batería, a lo largo de todo el horizonte de cálculo, que es de un año. Es la división entre la energía faltante (Consumo-E_d) para todos los días y los días en que la batería se vacía, es decir, alcanza el límite de descarga establecido. En este caso se ha obtenido un valor de 37,6Wh. Como el porcentaje de días en que la batería se vacía es del 0,6%, se puede calcular el porcentaje de energía que no se satisface como:

$$0,6\% * 365 = 2,19 \text{ días}$$

$$37,6 \text{ Wh} * 2,19 \text{ días} = 82,3 \text{ Wh}$$

$$\frac{82,3 \text{ Wh}}{136,8 * 365} = 0,16\%$$

Por consiguiente, no se satisface un 0,16% de la demanda, lo cual es un valor considerablemente bajo.

La herramienta ofrece los resultados que se han mostrado previamente (en la Ilustración 47) en forma de gráfico, los cuáles se presentan a continuación:

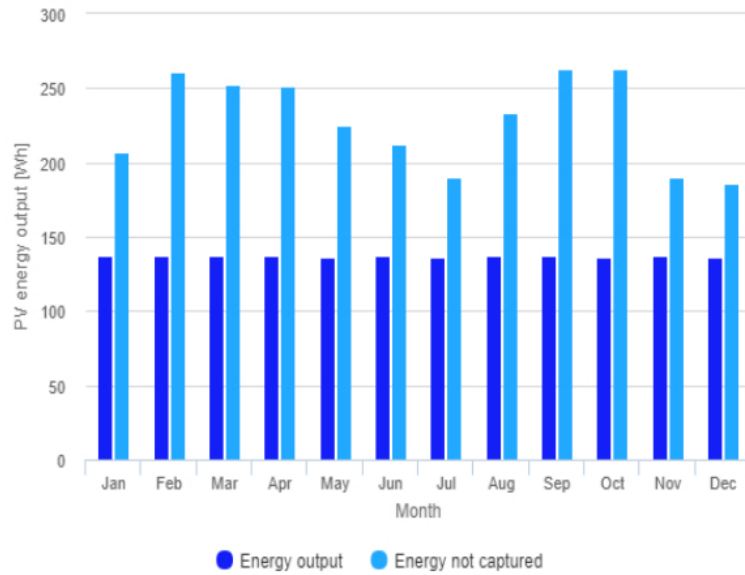


Ilustración 48. Gráfico E_d y E_I (Fuente PVGIS)



Ilustración 49. Gráfico estado carga de la batería (Fuente PVGIS)

Dado que el horizonte temporal es de un año, se considera que el valor de energía faltante es considerablemente bajo. Además, si se observan los valores de E_d, se puede ver que todos los meses se cumple con la demanda requerida, y aquellos en los que no se hace la diferencia es como máximo de 0,3Wh/día de media (diciembre). La batería no queda

completamente vacía en prácticamente ningún momento (tal y como se observa en la Ilustración 49, se vacía únicamente el 0,6% de días de diciembre), lo cual permite afirmar que la calidad del suministro es buena.

Se ha realizado el mismo procedimiento, pero con la demanda que cuenta con frigorífico. En este caso, los resultados obtenidos han sido:

Mes	E_d	E_I	f_f	f_e
Enero	330.8	357.6	88.9	0.6
Febrero	329.4	465.7	93.2	0.3
Marzo	329.8	449.2	92.7	0.0
Abril	329.8	446.3	95.8	0.3
Mayo	329.7	393.6	95.0	0.0
Junio	329.9	368.6	93.0	0.0
Julio	329.2	325.1	93.8	0.0
Agosto	330.2	410.9	94.4	0.3
Septiembre	329.4	470.5	95.8	0.0
Octubre	329.3	470.2	96.5	0.0
Noviembre	330.2	324.4	83.3	0.6
Diciembre	327.8	316.2	81.6	0.9

Ilustración 50. Resultados PVGIS módulo 240Wp y batería de 50Ah (Fuente PVGIS)

El valor del promedio de energía faltante es de 71,36Wh, un 0,65% de la demanda total, siguiendo el mismo método de cálculo que se ha mostrado previamente.

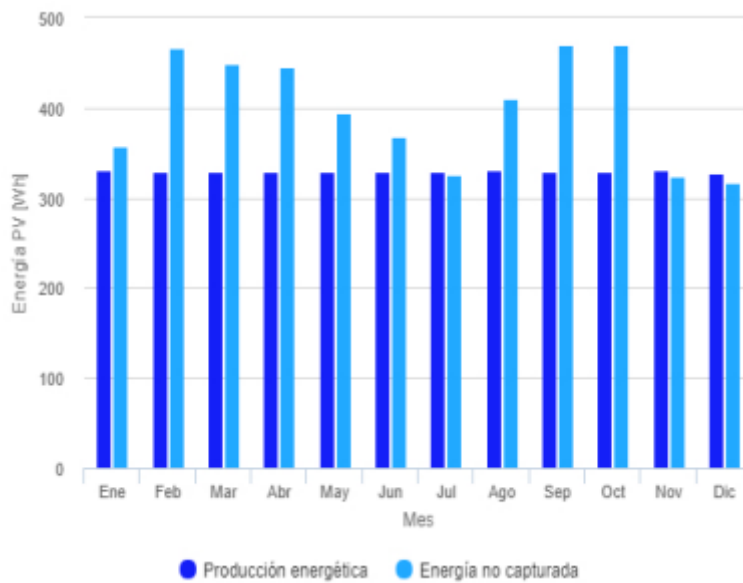


Ilustración 51. Gráfico E_d y E_I (con frigorífico) (Fuente PVGIS)



Ilustración 52. Gráfico estado carga de la batería (con frigorífico) (Fuente PVGIS)

En este caso, la calidad del servicio ofrecido es superior. Como se puede observar, considerando que la demanda es de 329,8Wh diarios, hay 6 meses en los que de media no se cumple, aunque la diferencia es muy pequeña (0,1Wh en mayo).

Igual que en el caso anterior, se considera que la energía faltante es pequeña considerando todo el horizonte de cálculo, un año.

3.7. Calidad y normativa técnica

La calidad es un tema especialmente relevante en el despliegue de la electrificación con SFA. Esto es así por su repercusión en la calidad de servicio, ya que cualquier incidencia representa interrupciones del servicio que pueden ser prolongadas por las dificultades de acceso. Y también por la repercusión económica que representa para el proveedor del servicio ya que los desplazamientos de técnicos para resolver las incidencias es un tema costoso económicamente.

En resumen, la electrificación en la última milla requiere una atención especial a la calidad durante todas las fases del proceso de electrificación. En la tabla 12 se muestra esquemáticamente los aspectos de calidad en las diferentes fases del ciclo de vida de los SFA.

1 Análisis	2 Diseño	3 Adquisición	4 Instalación	5 Operación	6 Desmontaje
Actividades <ul style="list-style-type: none"> Selección de usuarios Encuesta socioeconómica Talleres de sensibilización 	Actividades <ul style="list-style-type: none"> Dimensionado Selección de tecnologías Modelo de suministro 	Actividades <ul style="list-style-type: none"> Pliegos Evaluación Adjudicación Seguimiento Recepción 	Actividades <ul style="list-style-type: none"> Distribución de equipos Instalación Puesta en marcha 	Actividades <ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento y reparación Cobro 	Actividades <ul style="list-style-type: none"> Recuperador homologado Reposición de equipo
Calidad <ul style="list-style-type: none"> Gestión coherente de expectativas Información y compromisos veraces y transparentes 	Calidad <ul style="list-style-type: none"> Sostenibilidad y asequibilidad Escalabilidad 	Calidad <ul style="list-style-type: none"> Productos Homologados Empresas homologadas Protocolos de ensayo 	Calidad <ul style="list-style-type: none"> Procedimiento detallado Verificación por tercero 	Calidad <ul style="list-style-type: none"> Control y seguimiento de la atención Medición detallada de calidad del servicio 	Calidad <ul style="list-style-type: none"> Vigilancia de afecciones
Documentos <ul style="list-style-type: none"> Resultados encuesta socioeconómica Lista de usuarios georreferenciados 	Documentos <ul style="list-style-type: none"> Especificaciones básicas 	Documentos <ul style="list-style-type: none"> Documentos proceso licitación Informes de seguimiento del suministro Recepción en fábrica Recepción en almacén 	Documentos <ul style="list-style-type: none"> Informe de inspección Instrucciones de instalación Talleres de capacitación de usuarios en el uso correcto de SHS 	Documentos <ul style="list-style-type: none"> Informes de operación Manuales y procedimientos Evaluación de calidad y grado satisfacción Gestión de garantías 	Documentos <ul style="list-style-type: none"> Certificado de recuperación

Tabla 12. La calidad en el ciclo de vida de los SFA (Fuente: Julio Eisman)

En este apartado sólo se va a desarrollar la calidad del producto (equipos SFA).

Normativa internacional y especificaciones técnicas de SFA

En la actualidad, los estándares de calidad para la electrificación universal son publicados por la IEC. Estas normas internacionales y especificaciones técnicas hacen referencia tanto a productos pico PV como a SFAs. Están basados y reemplazan a los desarrollados bajo el programa Lighting Global. En concreto, los estándares de calidad quedan recogidos bajo la norma IEC TS 62257-9-8 (VeraSol, 2023a).

La normativa IEC es la más conocida y respetada a nivel mundial en el ámbito de equipos eléctricos. Dado que los gobiernos conocen esta normativa, su uso asegura una mayor homogenización en la aplicación de los estándares y permite que su aplicación sea más sencilla. Con unos estándares comunes, los fabricantes pueden diseñar nuevos equipos y venderlos en diferentes mercados, realizando únicamente un ensayo de verificación. Esto permite que la introducción en el mercado sea más rápida y que, por consiguiente, se acelere el proceso de electrificación mundial.

Adicionalmente, muchos países trasladan las normas internacionales a su sistema nacional de normas. Este es el caso de Bangladesh, Perú, Bolivia, etc. que tienen normas propias basadas en los estándares internacionales de la Comisión Electrotécnica Internacional. Adicionalmente, también pueden existir códigos nacionales para la instalación de los SFA. Por tanto, es importante identificar la normativa nacional antes de iniciar un programa de electrificación con SFA.

Los estándares de calidad cubren las siguientes áreas:

- Veracidad en la información y publicidad ofrecida al consumidor
- Garantía de los equipos
- Requerimientos de conectividad
- Mantenimiento de la iluminación en el tiempo
- Salud y seguridad
- Requerimientos de las baterías
- Calidad y durabilidad
- PAYG

A continuación, se especifica la normativa IEC que puede aplicar a cada uno de los componentes de los SFAs:

Paneles solares

- IEC 61215: Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval
- IEC 61730: Photovoltaic (PV) module safety qualification

Baterías de Litio

- IEC 62619:2017: Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications.
- IEC 62281:2016: Safety of primary and secondary lithium cells and batteries during transport.

Controladores de carga

- IEC 62109-1: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems
- IEC 60335-1 and IEC 60335-2-29
- IEC 62509

Cables y conexiones

- IEC 62548:2016, 7.3.7 *Cables*
- IEC 60364-7-712:2017, 712.52 *Wiring systems*
- IEC 62852 (for PV module connectors)

En términos generales, cabe destacar las dos normas siguientes:

- IEC TS 62257-9-5:2018, titulada “Recommendations for renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 9-5: Integrated systems - Laboratory evaluation of stand-alone renewable energy products for rural electrification”. La normativa se aplica a productos de energía renovable independientes. La norma trata principalmente sobre sistemas de energía renovable autónomos con baterías y módulos solares que funcionen con corriente continua, no superen los 35 V y no excedan los 350Wp.
- IEC TS 62257-9-8:2020, titulada “Renewable energy and hybrid systems for rural electrification –Part 9-8: Integrated systems – Requirements for stand-alone renewable energy products with power ratings less than or equal to 350 W”. Esta norma establece requisitos básicos de calidad, durabilidad y veracidad en la publicidad para proteger a los consumidores de SFAs. La evaluación de estos requisitos se basa en pruebas descritas en la norma IEC TS 62257-9-5.

Ensayos de verificación

Los componentes de los SFAs se verifican realizando ensayos de prueba en laboratorios homologados que certifican el cumplimiento con la norma. Los ensayos deben ser hechos por un laboratorio acreditado de acuerdo con la norma ISO/IEC 17025:2017, titulada “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”, que

especifica los requisitos generales de competencia, imparcialidad y operación consistente del laboratorio.

Las entidades homologadas certificadoras como VeraSol⁴⁰ someten los SFA a ensayos para certificar su cumplimiento de acuerdo con la norma técnica. Además, también se realizan ensayos de conformidad a los equipos consumidores que se van a usar con los SFAs. Estos ensayos estandarizados permiten que se puedan comparar de forma consistente distintos equipos (VeraSol, 2023b).

3.8. Tecnología Pay as you Go (PAYG)

La tecnología PAYG libera el suministro de energía del SFA mientras se haya introducido un código de desbloqueo por un periodo de tiempo determinado. De esta forma se garantiza el prepagado de la cuota temporal y la indisponibilidad de la energía mientras no se haya abonado dicha cuota y generado el código de desbloqueo que introducido en el SFA permite el uso de la energía. Esta tecnología se puede usar para la venta de equipos a plazos, de tal forma que se libera el SFA y se transfiere su propiedad una vez se hayan abonado las cuotas acordadas. Aplicado a un modelo de energía como servicio el usuario paga una cuota periódica que le permite disfrutar de la energía disponible del SFA. En caso de que no se realice alguno de los pagos, el sistema dejará de funcionar, pero no será necesaria su devolución. Cuando el consumidor paga de nuevo, se restablece el servicio. Es, por consiguiente, un método de pago por adelantado. Si el usuario no paga no puede disfrutar del servicio. Esta tecnología permite abaratar los procesos de corte de suministro por impago al no tener que desplazarse ningún técnico. También facilita el pago de las tarifas acordadas.

En referencia a la forma de pago, si el usuario dispone de cobertura telefónica, puede realizar el pago periódico a través de su móvil. Si no se dispone de cobertura, los pagos se realizan en un comercio local. Este comercio será cercano a las regiones donde se instalen los equipos, de modo que los usuarios puedan desplazarse periódicamente a realizar el pago y obtener su código de desbloqueo que introduce manualmente en el SFA para liberar la disponibilidad de energía. Cuando se introduce el código, el equipo empieza a funcionar.

El código es generado por una aplicación web. Actualmente, existen diversas aplicaciones de software como servicio (SaaS) que gestionan el método de pago PAYG. Entre ellas, destaca la aplicación Angaza⁴¹. Esta aplicación cobra por el uso de su software a la empresa proveedora de los SFAs una cuota anual por equipo.

El siguiente esquema refleja el funcionamiento de este método de pago:

⁴⁰ <https://verasol.org/>

⁴¹ <https://www.angaza.com/>



Ilustración 53. Funcionamiento método PAYG (Elaboración propia)

Esta tecnología ha permitido alcanzar a un número mayor de ventas de SFA a plazos, ofreciendo un servicio de calidad elevada, con ventajas técnicas y financieras. Permite que estos consumidores disfruten del servicio sin tener que devolver el aparato en caso de demora en el pago. Sin embargo, algunas empresas proveedoras del servicio eléctrico han atravesado dificultades económicas por no verificar de manera rigurosa la capacidad de pago de los consumidores. La compra e instalación de los SFAs requiere una fuerte inversión inicial en activos por parte de los proveedores del servicio, que debe ser recuperada con el tiempo gracias al pago de las tarifas de los usuarios. Por este motivo, se debe comprobar que existe una capacidad y compromiso de pago por parte del consumidor antes de contratarle el servicio.

Pese a que inicialmente esta tecnología nació para permitir la financiación de la venta de SFAs, cada vez más se utiliza también para financiar equipos consumidores. El porcentaje de usuarios que adquiere equipos con esta tecnología se encuentra en aumento. De hecho, un 48% de los equipos certificados por VeraSol en 2021 se podía financiar mediante PAYG, frente al 37% en 2019 (Lighting Global, 2022).

3.8.1. Problemática de la conectividad y sinergias con el acceso a la energía

A nivel mundial, aproximadamente 2.900 millones de personas no tuvieron acceso a internet en 2021. Esta disparidad, conocida como la "brecha digital", es más pronunciada en los países en desarrollo. El 96% de las personas sin acceso vive en países en desarrollo (Economist Impact, 2022). Muchos otros están conectados de manera limitada, es decir, utilizan internet, pero lo hacen de manera infrecuente.

Como se puede observar, la brecha es especialmente amplia en las áreas rurales, donde se requiere la implementación de nueva infraestructura, el servicio es costoso de operar y los ingresos de las empresas de telecomunicaciones son bajos.

El Índice Inclusivo de Internet (3i)⁴², elaborado por Economist Impact y encargado por Meta, evalúa a los países en función de la capacidad de sus ciudadanos para utilizar Internet con fines personales y de enriquecimiento social.

La primera versión del 3i, elaborada en 2017, indicó que la barrera principal para el acceso a Internet era la falta de cobertura de electricidad. Los datos más recientes sugieren que aproximadamente el 89% de la población tiene cobertura de red 2G en países de bajos ingresos. Sin embargo, solo el 15% de los hogares en países de bajos ingresos pueden acceder a Internet. Como resultado, persiste una brecha entre la "cobertura" y el "uso" (Economist Impact, 2022).

Sin embargo, sin acceso a la electricidad en los hogares, conectarse a Internet representa un desafío significativo, principalmente debido a la dificultad para cargar los dispositivos. Aunque las personas puedan vivir en comunidades cubiertas por redes 3G, el uso de smartphones será limitado si carecen de electricidad en casa.

Un estudio de Facebook y la Universidad de Massachusetts Amherst demostró que el acceso a la electricidad de los hogares tiene una fuerte relación con su conectividad a Internet. Se analizaron dos conjuntos de datos: datos internos de la aplicación de Facebook para usuarios en Kenia y datos de la Corporación de Energía y Luz de Kenia (Facebook, 2018). Los resultados mostraron que los hogares que se habían conectado recientemente a la red eléctrica experimentaban un aumento significativo y duradero en la utilización de dispositivos y la creación de nuevas cuentas en la plataforma de Facebook. Concretamente, para cada nueva conexión a la red:

- Se conectaba un teléfono adicional a la plataforma.
- 52% de los nuevos usuarios se mantenía activo en la cuenta en los primeros 12 meses.

Dado el gran impulso que han adquirido los SFAs como fuentes de energía primaria en las comunidades rurales aisladas, juegan un papel crucial en el acceso a Internet de estas. La posibilidad de acceder a Internet puede también facilitar el uso de la tecnología PAYG, permitiendo facilitar el pago de las cuotas mensuales a través del smartphone de los usuarios y el desbloqueo directo de los SFA.

Por otro lado, el despliegue de comunicaciones de alta velocidad en zonas remotas puede requerir energía eléctrica para alimentar los equipos repetidores. Por tanto, el proveedor del servicio de electricidad puede ayudar al despliegue de la red de telecomunicaciones facilitándole acceso a la electricidad, y, a su vez, se puede beneficiar de los servicios de conectividad en su modelo de suministro.

⁴² <https://impact.economist.com/projects/inclusive-internet-index/reports>

4. Modelos de suministro

En el presente capítulo se realizará un análisis de los diferentes modelos de suministro que existen para los sistemas fotovoltaicos aislados.

4.1. El papel del modelo de suministro en el proceso de electrificación

Existen muchos modelos de suministro que permiten la electrificación de una región. En la elección de uno u otro intervendrán la tecnología seleccionada y la estimación de demanda para esa región, factores que dependen de la disponibilidad de recursos y del grado de consumo y dispersión de los usuarios de esa zona.

Dado que las regiones de la última milla se caracterizan por presentar grados de dispersión elevados de sus clientes, el método de electrificación que se empleará será el de SFA, centrándose por consiguiente la elección y presentación de los modelos de suministro en este modo de electrificación (Krithika & Palit, 2013).

El planteamiento del suministro debe garantizar la permanencia en el tiempo y ser consistente con una visión sólida de futuro para el sector eléctrico del país. Además, cabe destacar que, para poder cumplir con esa visión, el modelo de negocio y regulatorio que se va a plantear debe proporcionar seguridad jurídica y ha de tener viabilidad económica. Por otro lado, el coste de suministrar electricidad a las poblaciones de la última milla es mucho mayor que el de hacerlo en aquellas zonas donde es razonable la extensión de red, hecho que supone un gran reto a la hora de diseñar el modelo de suministro.

Por consiguiente, y como se verá a lo largo del capítulo, el siguiente esquema muestra la relevancia y el papel de la elección del modelo de suministro en el proceso de electrificación:



Ilustración 54. Papel modelo de suministro en proceso de electrificación (Elaboración propia)

Como se observa, el modelo de suministro juega un papel clave a la hora de planificar e implementar los procesos de electrificación. Además, el papel político será importante a la hora de seleccionar el modelo que se va a implementar, ya que los Gobiernos pueden favorecer en gran medida la financiación de los equipos, y que esto determine el modelo que se va a aplicar. Por último, la regulación existente debe sustentar el modelo de suministro implementado, de modo que se favorezca el modo de electrificación con sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA).

4.2. Sostenibilidad y asequibilidad

La elección del modelo se hará principalmente en base a dos factores: su asequibilidad y sostenibilidad.

El criterio de asequibilidad debe garantizar no dejar a nadie atrás, pero considerando que el servicio se va a ofrecer a personas con bajos ingresos. Tal y como se ha mostrado en el *Capítulo 1. Problemática*, las regiones con mayores porcentajes de hogares sin electrificar suelen presentar los índices de pobreza multidimensional más elevados. Como criterio de asequibilidad se suele usar que los gastos energéticos no superen el 10% de los ingresos totales⁴³. Lo que se trata de evitar es la llamada “trampa de la pobreza”, es decir, que haya un incremento de gastos que reduzca la disponibilidad de recursos para otros bienes esenciales, provocando mayor nivel de pobreza. Sin embargo, este criterio resulta de difícil aplicación en la última milla porque los ingresos no suelen ser homogéneos en el tiempo y los potenciales usuarios suelen ser reticentes en desvelar sus ingresos, y aunque hay métodos para conocer dichos ingresos requieren un trabajo adicional no despreciable.

Otro criterio de asequibilidad más sencillo de aplicar y que se ha probado en casos concretos se refiere al cálculo del coste medio de energéticos sustituibles por SFA. Es decir, calcular cuánto ya se están gastando durante un periodo de tiempo en la compra de elementos fungibles para iluminación, como velas, queroseno, pilas para linternas, para comunicación, como carga del móvil o pilas para la radio, y para otros usos. Muchas veces los usuarios no son conscientes del coste de estos energéticos sustituibles por un SFA, y conviene realizar este cálculo conjuntamente en una asamblea de la comunidad. Una vez acordado el coste medio en que ya se está incurriendo en el gasto de energéticos, éste debe ser el tope máximo de la tarifa para uso del SFA. En definitiva, gastando menos de lo que ya se viene gastando se tiene acceso a un servicio energético con prestaciones mucho mejores: mayor nivel de iluminación, reducción del riesgo de incendio o de quemaduras, eliminación del consumo de tiempo para la compra de energéticos, posibilidad de uso de TV, tabletas, ventiladores o refrigeradores. Estos son argumentos definitivos para la presentación y aceptación por la comunidad de un proyecto de electrificación con SFA. Es imprescindible hacer el cálculo de los energéticos sustituibles en cada caso concreto, ya que además de servir de concienciación de la comunidad puede haber situaciones muy dispares en entornos diferentes. Por ejemplo, mientras que en las comunidades rurales de Cajamarca (Perú) el principal gasto se centra en energéticos para iluminación, en los campos de refugiados de Tigray (Etiopía) éste es la carga del móvil ya que es usado no sólo para comunicarse con su país de origen sino como elemento de iluminación o de entretenimiento (escuchar música). Hay que considerar que cualquiera que sea el criterio de asequibilidad, al ser general la tarifa para un entorno, siempre habrá casos concretos que no habrá más remedio que considerarlos de forma específica. En esta labor puede ser muy útil la participación de los órganos de gobierno de la comunidad, aportando información y validando las propuestas. Las consecuencias que se derivan de seguir este criterio han sido medidas por algunos programas como el de Luz en Casa Perú⁴⁴ (ACCIONA, 2023). En este programa, la implantación de los SFA permite aproximadamente el ahorro de 800.000€/año en energéticos alternativos (107€ por hogar y año) y el aumento de 4.750.000 horas anuales dedicadas, por ejemplo, a comercios y actividades artesanas. Además, la mejora de la calidad del servicio minimiza el riesgo de enfermedades oculares y respiratorias (SEGIB et al, 2021).

La sostenibilidad es un criterio ya imprescindible en cualquier actividad humana, pero especialmente relevante para la provisión de servicios básicos a comunidades vulnerables

⁴³ https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47216/4/S2100433_es.pdf

⁴⁴ El programa se inició en 2009 en Cajamarca, el departamento con los índices más elevados de pobreza y de falta de electrificación en Perú, y desde entonces se han beneficiado 16.041 personas.

como las de la última milla. La sostenibilidad de un proyecto es la mejor garantía de permanencia en el tiempo. En la historia de la electrificación con SFA hay muchos casos de insostenibilidad por diferentes causas que han terminado en fracaso⁴⁵. Hay que considerar los tres aspectos principales de la sostenibilidad: social, ambiental y económico. A nivel social debe garantizar el empoderamiento de la comunidad mediante su participación en las decisiones. Se debe respetar escrupulosamente el criterio ya consagrado de información y consentimiento previo. A nivel ambiental el factor más influyente será el tratamiento de los sistemas una vez que no sean útiles, debido a que el impacto de su instalación y operación y mantenimiento es muy reducido. Por último, para que el modelo sea sostenible económicamente a largo plazo se debe garantizar que los ingresos del proveedor eléctrico sean suficientes para asegurar su viabilidad económica, de modo que el servicio se pueda mantener a largo plazo. Esto requiere que la estructura organizativa del proveedor del servicio implique la mayor eficiencia, reduciendo sus costes al mínimo. Para el modo de electrificación con SFA lo anterior no es trivial. Frente al modo de electrificación con extensión de redes donde se disponen de procedimientos optimizados a lo largo de más de un siglo, la electrificación con SFA es bastante reciente y requiere innovación para desarrollar y optimizar sus procedimientos. Hay que tener en cuenta que los procedimientos operativos de la electrificación con SFA serán diferentes a los de las redes y adaptados a sus peculiaridades. De nuevo, trabajar junto con las comunidades puede marcar la diferencia en la reducción de costes operativos.

Mientras la tarifa que debe pagar el usuario viene acotada por el criterio de asequibilidad, los ingresos que debe recibir el proveedor del servicio los condicionan el criterio de sostenibilidad económica. Cuando la sostenibilidad con la escala optimizada no puede garantizarse con las tarifas, es necesario buscar algunas formas de subsidios que cubra la diferencia.

4.3. Comparación de Modelos desde relación económica con los clientes

En la segunda mitad de 2022 (julio-diciembre), en el mundo se vendieron un total de 5,2 millones de kits solares. Este valor es un 20% superior al registrado en la primera mitad (GOGLA, 2022). Se estima que actualmente más de 420 millones de personas se benefician de estos productos, dado que, considerando la vida útil de los sistemas, en la actualidad hay cerca de 84 millones de equipos en funcionamiento (ESMAP, 2020).

Entre los factores que están impulsando la tendencia hacia una demanda de servicios energéticos cada vez más completa por poblaciones rurales destacan los siguientes: la reducción de costes de fabricación de los SFAs⁴⁶, la disponibilidad comercial de aparatos de consumo muy eficientes a precios cada vez más asequibles para los consumidores rurales y los modelos de negocio que utilizan la tecnología PAYG para la venta a plazos. A pesar de las reducciones del coste de fabricación de los SFAs y las facilidades de pago que ofrece la tecnología PAYG, parte de los hogares sin suministro eléctrico continua sin poder permitirse ni siquiera un producto de nivel 1 en la escala MTF. Por consiguiente, y

⁴⁵ En el siguiente informe se evalúa la insostenibilidad de los SFA instalados en regiones rurales del Salvador, y se proponen medidas para su mejora: https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1806/1/Propuesta_de_gesti%C3%B3n_para_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_aislados_de_electrificaci%C3%B3n_rural_en_.pdf

⁴⁶ Pese a que los costes de redujeron entre 2010 y 2020, entre el año 2020 y 2022 se ha observado un encarecimiento puntual debido a la pandemia del Covid-19. Por ejemplo, en estos dos últimos años, los precios de las linternas solares de 0-1.5 Wp aumentaron de \$8 a \$9, mientras que el segmento de 3-10 Wp registró un aumento de \$88 a \$91 durante el mismo período (Lighting Global, 2022).

dado que el objetivo es no dejar a nadie atrás, a continuación, se estudiarán los dos principales modelos de negocio existentes para la electrificación con SFAs desde el punto de vista de relación económica con los clientes: venta de equipos y energía como servicio (“energy-as-a-service-EaaS”), también llamado venta de disponibilidad de energía.

4.3.1. Venta de equipos

Se caracteriza porque hay una transferencia de la propiedad del equipo del vendedor al comprador. La venta puede ser al contado, financiada (mediante crédito de una institución financiera o microfinanciera al comprador o al vendedor) o donación (considerada forma de venta de equipos a coste cero). Durante el tiempo que dura la financiación los equipos suelen tener atención para reparaciones, pero cuando se completa el pago no se garantiza la reparación, renovación o reciclado de estos.

El principal inconveniente que presenta este modelo de negocio es la elevada inversión inicial que requiere, que para colectivos de ingresos bajos es únicamente asequible mediante subsidios. Sin embargo, la aplicación de subsidios deja sin definir cómo cubrir el coste de operación y mantenimiento, ya que solo cubren el coste de la inversión inicial. Este tema no es irrelevante ya que el valor actual neto de los costes de O&M durante los 20-25 años de la vida del proyecto suele ser bastante superior al coste de inversión.

Con el objetivo de poder obviar la barrera del coste de la inversión inicial, los programas de electrificación han utilizado diferentes métodos como la donación parcial del Estado, de agencias de cooperación o bancos de desarrollo en forma de subsidio a la inversión o la financiación de la venta mediante instituciones financieras. En el primer caso se puede dar por ejemplo una coordinación entre el sector público y una empresa privada, formando lo que se considera una Alianza Público-Privada para el Desarrollo⁴⁷. Esta alianza es un acuerdo en el que los recursos y habilidades de los sectores públicos y privados se combinan para proveer servicios. El sector privado proporciona sus recursos, conocimientos, capacidad de gestión y tecnología, mientras que el sector público establece las regulaciones y protege el interés público. Una alianza público-privada puede incluir también la participación de una organización sin ánimo de lucro u ONG (Eras-Almeida et al, 2019).

Un caso de éxito que se ha llevado a cabo gracias a una alianza Público-Privada es el caso de ACCIONA Microenergía en Oaxaca, México. Tal y como se acaba de mencionar, este programa se basa en una colaboración entre el Gobierno del Estado de Oaxaca, AECID (Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo), AMEXCID (Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo) y la asociación ACCIONA Microenergía México para aportar recursos y capacidades. El programa ofrece la instalación de equipos de más de 25W para iluminación y electrificación básica de las viviendas. Los equipos son subvencionados en un 50% por el Gobierno de Oaxaca, con el objetivo de hacerlos asequibles para sus usuarios. El 50% restante se soporta entre AECID, AMM y la aportación de los propios usuarios. Los centros de atención a Usuarios (CAU) de Acciona Microenergía México brindan los servicios de despliegue e instalación, postventa y mantenimiento. Finalmente, se asegura la participación activa de

⁴⁷ En el siguiente enlace se puede consultar el protocolo de la AECID (Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo) para la gestión de APPD: https://intercoonecta.aecid.es/Documentos%20de%20la%20comunidad/Protocolo_APPD.pdf

la comunidad beneficiaria mediante los Comités de Electrificación Fotovoltaica (CEF)⁴⁸, que permite a los usuarios hacerse protagonistas de sus actividades (Acciona, 2017).

Una importante reducción del precio de estos equipos fotovoltaicos se ha conseguido con el desarrollo de los sistemas pico fotovoltaicos (1-10Wp), que ha tenido éxito en África, lo cual ha facilitado su venta directa o financiada. Además, algunos fabricantes de estos sistemas han trabajado con agencias de desarrollo para poder desarrollar todos los eslabones de la cadena de suministro. La cadena de suministro suele suponer una dificultad a la hora de comercializar los equipos fotovoltaicos debido a que los importadores y fabricantes no conocen el contexto local, y, por lo tanto, no identifican potenciales asociaciones claves para el mercado que impulsan, lo que incrementa su inversión para expandir y mantener el mercado a niveles locales. Precisamente estos fallos en la cadena de suministro son una de las principales dificultades para disminuir la brecha de acceso a la energía en las regiones de la última milla. Además, debe sumarse que los servicios post-venta existentes en el mercado son bastante débiles, por lo cual las acciones de control de calidad, mantenimiento, reparación... son realizadas de forma tardía o en ocasiones no son solventadas. Por consiguiente, el desarrollo de un modelo de negocio que permita impulsar el mercado de los sistemas fotovoltaicos pasa por abordar esta problemática existente en la cadena de suministros, asegurar la calidad y aceptación de los productos y familiarizar a los diferentes actores con las tecnologías y el beneficio de proporcionarlas o adquirirlas (Varela & Verástegui, 2016).

Del mismo modo, la falta de una red local que permita la durabilidad y maximice la utilidad de los equipos fotovoltaicos está generando una filosofía de “usar y tirar” los equipos, ya que no se solucionan las reparaciones que requieren de personal entrenado. Por consiguiente, se reduce la vida útil real de los SFA. Por otro lado, los usuarios son reacios a pagar por las averías de los equipos, por lo que los sistemas de venta financiada funcionan bien cuando existe un volumen alto de ventas en la zona que sostiene la atención al cliente, pero la sostenibilidad de los SFA se complica cuando decrecen estas ventas.

Alquiler de los equipos

Por un lado, el alquiler de los equipos puede ser adecuado para clientes que no califican para la compra de estos, dado que las mensualidades de los SFA con alquiler suelen ser más asequibles que las de su compra. Por otro lado, el servicio puede ser apropiado para realizar una electrificación cuando el usuario estima que la red puede llegar pronto. Presenta una garantía de servicio permanente y garantiza el reemplazo de las baterías y servicios dañados.

Un ejemplo de proyecto que se ha llevado a cabo con éxito mediante el alquiler de equipos fotovoltaicos es el de Soluz en Honduras. Este proyecto permitió el alquiler de 1.500 equipos entre 1998 y 2006 (Hansen, 2016). Hoy en día, Soluz sigue facilitando el acceso a sistemas solares para habitantes de zonas rurales de Honduras. Sus productos se ofrecen junto opciones de venta con financiación favorables para estos usuarios, como son bajos intereses y plazos de pago de acuerdo con la capacidad de los mismos (SOLUZ, 2023). La tecnología PAYG ha permitido el alquiler disminuyendo el riesgo de impago. Incluso determinados equipos como TV o refrigeradores se han equipado con la tecnología PAYG. Con el fin de disminuir el tiempo de recuperación de la inversión, en algunos

⁴⁸ Se trata de órganos de representación que hacen de nexo con la compañía, y sus integrantes son elegidos por la comunidad, respetando que al menos uno de sus tres miembros sea mujer.

casos se ha aumentado la cuota periódica con el fin de que al cabo de cierto tiempo la propiedad pasa al usuario. En este caso no deja de ser una venta a plazos.

Donación

Está considerada una forma de venta a coste cero y, por consiguiente, presenta la principal ventaja de ser asequible para todo el mundo. Puede tener sentido en condiciones extremas y temporales (ayuda humanitaria). Sin embargo, no gestiona la reparación ni reposición de los equipos, y consecuentemente los equipos se degradan y producen insatisfacción, además de agravar su impacto ambiental. Asimismo, la donación puede destruir iniciativas que buscan promover la actuación local, al crear dependencia y no empoderar a los beneficiarios. El beneficiario no puede exigir calidad ni servicio, se debe conformar con lo que le regalan, y mostrar agradecimiento.

En los casos de donación es importante identificar y evitar los posibles impactos negativos.

4.3.2. “Energía como servicio”

Al contrario que en el modelo de venta de equipos, en este caso, la propiedad de los sistemas permanece en el proveedor del servicio. El usuario abona una tarifa por la disponibilidad de una cantidad de energía, que debe cubrir todos los costes durante toda la vida útil del equipo: comerciales, operación y mantenimiento y amortización de los activos invertidos. De este modo, el cliente paga por disponer de una cantidad de energía determinada por el dimensionamiento de los equipos SFA, independientemente de que la use o no.

Una de las principales ventajas que presenta este modelo es que se eliminan las barreras tanto de entrada como de salida; al no tener que abonar el cliente la inversión inicial y poder prescindir del servicio cuando lo desee.

Es el modelo más parecido a lo que ocurre en el modo de electrificación más generalizado: la electrificación con redes. De hecho, este modelo requiere que exista un proveedor del servicio eléctrico, una microutility, o empresa de servicios energéticos (ESCO), que se ocupe del mantenimiento, calidad y actividad comercial del servicio eléctrico.

Para poder mantener un buen servicio, es necesario disponer de una red de atención próxima a los clientes. Esta red puede estar compuesta por emprendedores locales con acuerdos de microfranquicia, de modo que se contribuya al desarrollo local. La microfranquicia se basa en una relación entre un franquiciado (pequeña empresa o autónomo) y un franquiciador (gran empresa o marca). El franquiciado produce o comercializa un producto o servicio de un proyecto diseñado por el franquiciador, mientras que este último es responsable de la publicidad, apoyo y marketing. La microfranquicia está diseñada para ofrecer oportunidades a los más pobres de modo que puedan controlar un negocio, mejorar sus capacidades y tener una mayor seguridad económica. En el sector eléctrico, las microfranquicias han sido introducidas para entregar facturas, recaudar ingresos o leer contadores (Eras-Almeida et al, 2019).

Cabe destacar que las tarifas pueden definirse de mutuo acuerdo entre proveedor y cliente o pueden estar reguladas por el regulador eléctrico. Sin embargo, pese a permitir este modelo reducir la inversión inicial, la atención a los usuarios de la última milla requiere costes de logística y transporte elevados, por lo que en muchos casos los subsidios son

necesarios. Al aparecer los subsidios, el servicio debe ser regulado. Conviene considerar que en muy pocos países se aplica el subsidio de operación y mantenimiento para los SFA. Por este motivo, es necesaria la actuación del papel político para reformar la regulación y que las tarifas sociales se puedan aplicar a los electrificados con SFA. Por consiguiente, la normativa específica es clave para determinar la sostenibilidad del servicio.

Dado que siguiendo este modelo de negocio los SFA se pueden volver a entregar a otros clientes en caso de incumplimiento de pago, las empresas que los siguen no suelen centrarse en evaluar el riesgo de impago antes de aprobar un nuevo cliente. Además, permite contemplar la posibilidad de que se pueda añadir capacidad adicional de batería, paneles solares, luces y electrodomésticos, incrementando el nivel de servicio (escalabilidad). El principal cambio que experimentará el cliente será que pagará una tarifa más alta por un sistema de mayor potencia y funcionalidad.

Sin embargo, debe estudiarse rigurosamente el coste de O&M de cada contexto, dado que, en algunas regiones alejadas con una red de transporte terrestre deficiente, este coste puede llegar a ser muy elevado. Además, al no ser propietarios de los dispositivos, los clientes de este modelo de negocio pueden tener menos incentivos para cuidar los equipos y llevarlos a sus límites, lo que conlleva mayores requisitos de supervisión.

4.4. Comparación de modelos desde los objetivos de electrificación Universal

En esta sección, se plantea una comparación de modelos desde el punto de vista de satisfacer el objetivo de proporcionar servicios energéticos con sistemas fotovoltaicos autónomos a todos aquellos potenciales consumidores de una zona previamente designada a partir de un proceso de planificación integrada.

Cuando se plantea este objetivo, aparece una dificultad obvia: cómo incentivar a las empresas para que proporcionen sus servicios en regiones donde aparentemente no les resulta rentable. Dentro de un mismo país, se pueden encontrar distintos modelos de negocio que permiten asociar una determinada región a un proveedor en concreto. Estos modelos pueden ser de concesión o de distribución.

4.4.1. El modelo del concesionario

Se basa en que las autoridades seleccionan determinadas regiones que requieren ser electrificadas y asignan dicha responsabilidad a un proveedor de electricidad, normalmente en condiciones de exclusividad y con el compromiso de su electrificación. El proveedor del servicio puede ser una organización privada, pública o mixta. Normalmente la selección del proveedor se lleva a cabo bajo un concurso público competitivo que garantice el menor coste para el Estado. Este sistema incita a la reducción de costes y mejores servicios para conseguir ganar el concurso. Además, los concesionarios son los responsables de expandir y de mantener activo el servicio durante toda la vida útil del contrato.

Este mecanismo presenta la ventaja de permitir seleccionar al proveedor que está dispuesto a ofrecer el servicio al menor coste posible y dirigir los esfuerzos para satisfacer las necesidades de las comunidades rurales. A su vez, presenta la dificultad de garantizar el manejo adecuado de aspectos blandos como la formación de usuarios, empoderamiento de la comunidad, etc.

El modelo de concesionario está relacionado con el modelo de energía como servicio.

4.4.2. El modelo del distribuidor

Este modelo promueve la comercialización, por parte de empresas minoristas locales, de equipamiento de SFAs. Está dirigido a consumidores off-grid que compran o arriendan el sistema asumiendo total responsabilidad sobre los costes de operación y mantenimiento. La distribución de equipos está asociada al modelo de venta de SFAs anteriormente descrito en sus diferentes modalidades.

En algunos casos el cálculo de la contribución de los usuarios finales en las zonas más remotas y desfavorecidas resulta demasiado elevado para la capacidad de pago de estos, por lo que el gobierno interviene. La política de intervención se basa en ofrecer subsidios a las empresas con el objetivo de reducir el coste unitario de venta de los sistemas eléctricos, de modo que los consumidores finales deban pagar menores precios por los equipos. Sin embargo, las empresas se han mostrado poco interesadas en participar dado que se resisten a otorgar créditos y subsidios a los consumidores.

Este modelo fue implementado en Bolivia a través del Programa de Infraestructura Descentralizada para la Transformación Rural (IDTR)⁴⁹. Además, también fue empleado en Nicaragua en el proyecto PERZA⁵⁰ y Honduras en el proyecto PROSOL⁵¹.

4.5. Elección del modelo

4.5.1. Venta de equipos vs “energía como servicio”

La siguiente tabla presenta una comparación de los dos modelos de negocio en función de la relación económica con el cliente presentados anteriormente, atendiendo a criterios de asequibilidad y sostenibilidad, así como su impacto social.

Modelo de suministro	Venta	Energía como servicio
Asequibilidad	Barrera de pago inicial Depende de la financiación	Sin barrera de acceso inicial La limitación puede aparecer por la cuota periódica a pagar
Sostenibilidad económica	Depende de la existencia de potencial negocio en la zona	Garantiza la permanencia del proveedor al incluirse en la cuota gastos de operación, de mantenimiento y de reposición
Sostenibilidad ambiental	No se garantiza la reparación más allá del plazo de financiación Nadie gestiona reutilización ni reciclado	El proveedor gestiona la reparación, la reutilización y el reciclado.
Impacto social	Crea poco valor local: distribución	Crea valor en el emprendimiento local para la reparación, atención

⁴⁹ <https://documents1.worldbank.org/curated/ar/688201468197097323/pdf/97552-2010Sep20-P073367-SPANISH-Bolivia-Decentralized-Infrastructure-Box-391482B-PUBLIC.pdf>

⁵⁰ https://ieg.worldbankgroup.org/sites/default/files/Data/reports/ppar_nicaraguaperza.pdf

⁵¹ <http://www.energetica.org.bo/elecsol/documentos/pdf/06%20Diana%20Soliz.pdf>

		y venta de dispositivos compatibles
--	--	-------------------------------------

Tabla 13. Comparación modelos suministro (Elaboración propia)

Como se puede observar, el modelo que presenta más ventajas es el de energía como servicio. Este modelo:

- Permite una mayor involucración y presencia del proveedor eléctrico de forma permanente, facilitando el empoderamiento de la comunidad local. Además esto permite manifestar a las comunidades aisladas que no lo están tanto. Si además el proveedor se involucra en la resolución de otros temas de la comunidad, el modelo se vuelve muy valioso en tanto a creador de valor social.
- Incrementa la asequibilidad del suministro eléctrico en comunidades remotas con bajos ingresos económicos dado que no existe pago inicial y reduce el coste mensual para el usuario final. Esto es posible ya que se extiende la recuperación de la inversión sobre un período más largo.
- Facilita la posterior incorporación del usuario a otros modos de electrificación (microrredes o red principal) que normalmente funciona con pago por servicio.
- Facilita que el usuario continúe con suministro eléctrico, aunque haya que reemplazar el equipo una vez inservible.
- Garantiza la presencia continuada del suministrador bajo un esquema de derechos y de deberes. En comparación, el modelo de venta de equipos permanecería localmente mientras haya ventas, pero una vez saturado el mercado no queda claro el mecanismo para mantener su estructura.

Algunos usuarios quieren acabar siendo propietarios de los SFAs. Esto no es lo más recomendable desde lo asequibilidad y sostenibilidad del modelo y conviene asesorar detalladamente de las ventajas del modelo Energía como servicio, especialmente en su aspecto de aproximación a una forma de relación ya establecida para el resto de modos de electrificación.

4.5.2. Concesionario vs Distribuidor

Estas figuras están íntimamente ligadas a los respectivos modelos de energía como servicio y venta. La figura de uno de estos dos modelos, el modelo de concesión merece especial interés, dado que permite atraer inversiones en las zonas no electrificadas, económicamente eficientes y asegurando el suministro a largo plazo. Las concesiones deben hacer uso de los tres modos de electrificación para suministrar electricidad a todas las demandas de un territorio. Aunque a veces, pueden participar de forma asociada, diferentes proveedores especializados en cada modo de electrificación.

Cuando las concesiones se asignan a empresas privadas o mixtas, éstas se responsabilizan de explotar, mantener y expandir los activos de acuerdo con unos términos prefijados, con la obligación de retornar dichos activos al sector público a la finalización del período de concesión.

Cabe destacar que a la hora de implementar una concesión es clave la cooperación entre los concesionarios y las empresas de servicios públicos locales. Además, la implementación de las concesiones a gran escala requiere una amplia experiencia desde una perspectiva institucional, financiera y técnica. Por último, el apoyo político es fundamental para garantizar el diseño de concesiones que traspasen el horizonte político típico de una legislatura.

5. Planificación de Acceso Universal a la Electricidad

El presente capítulo discutirá cómo suele realizarse la planificación para el acceso universal a la energía. Además, presentará distintas herramientas que pueden emplearse para llevar a cabo esta planificación con éxito.

5.1. Planificación convencional

En países donde todavía no se ha conseguido el acceso eléctrico universal, la planificación del sistema eléctrico se viene haciendo basándose en la extensión de redes, y aquellas demandas que no se pueden servir con extensión de redes a un coste razonable, o bien quedan desatendidas o se reservan para los sistemas aislados (Minirredes y SFA). A su vez, y mediante criterios simples, se decide la electrificación con minirredes cuando hay concentración de demandas (por ejemplo, localidades con más de 25 viviendas) o con SFA para poblaciones con menos viviendas. Es evidente que esta forma de planificar basada principalmente en extensión de redes no considera aspectos críticos como la dispersión de la demanda ni da una solución técnico-económica óptima para toda la demanda a servir. Esto, a su vez, ocasiona que los planes sean poco estables creando inseguridad a los proveedores del servicio eléctrico y, en definitiva, paralizando las inversiones para electrificación aislada.

Un ejemplo de esta planificación lo encontramos en el Plan Nacional de Electrificación Rural de Perú⁵². Este plan tiene como objetivo llevar la electricidad a todos los peruanos. Principalmente se basa en la extensión de redes. Sin embargo, el plan menciona que: “La DGER⁵³ viene utilizando, cada vez con mayor intensidad, los paneles solares como una alternativa de suministro de energía a localidades rurales y/o comunidades nativas muy aisladas, donde no es posible llegar con los sistemas convencionales, para atender las necesidades básicas de energía eléctrica de estas localidades, priorizando las zonas de frontera y la amazonia”.

5.2. Necesidad de una planificación integrada

En las comunidades de la última milla, la planificación de la electrificación es fundamental para garantizar que el acceso universal a la electricidad se logre de manera efectiva y sostenible, y para asegurarse de que se estén satisfaciendo las necesidades de las comunidades locales. La planificación eléctrica debe tener como objetivo conseguir el acceso universal en un horizonte temporal razonable.

Además, la electrificación debe ser coherente con una visión a largo plazo del sector eléctrico, lo cual implica adoptar una perspectiva integrada de la red y de los sistemas aislados. Es importante considerar que, en el futuro, los usuarios que inicialmente cuentan con SFAs podrán ser conectados a minirredes o al sistema de la red eléctrica nacional.

La planificación integrada es, por consiguiente, un plan de electrificación de coste mínimo que debe permitir la consideración de los tres modos de electrificación (extensión de red, minirredes y SFA), para aquellas poblaciones que aún carecen de servicio. Esto

⁵²<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1987203/PLAN%20NACIONAL%20DE%20ELECTRICIDAD%20RURAL%202021%20-%202023.pdf>

⁵³ Dirección General de Electrificación Rural

permite obtener ahorros en los costos de servicio, al mismo tiempo que se garantizan niveles adecuados de calidad eléctrica según cada situación.

La ausencia de esta forma de planificar puede dar lugar al desmontaje de sistemas individuales al poco de ser instalados como consecuencia de la llegada de las redes. Estas circunstancias aumentan los costes y desaniman las iniciativas de electrificación.

Concretamente, con respecto a los SFAs, la planificación integrada facilita la identificación de las áreas donde el suministro eléctrico debe ser proporcionado a través de sistemas aislados, así como la determinación del horizonte temporal en el cual no se prevé que esta forma de electrificación sea reemplazada o complementada por la conexión a una minired local o a la red principal.

En concreto, esta planificación es esencial por los siguientes motivos:

1. Identificar y priorizar áreas: la planificación puede ayudar a identificar las áreas donde es necesario mejorar el acceso a la electricidad y priorizar las inversiones en infraestructura eléctrica en esas áreas.
2. Establecer objetivos y metas: la planificación puede ayudar a establecer objetivos y metas claros para la electrificación, lo que puede ser útil para medir el progreso y garantizar que se estén logrando los resultados deseados.
3. Asignar recursos: la planificación puede ayudar a asignar los recursos necesarios de manera eficiente y efectiva, lo que puede ser particularmente importante en contextos donde los recursos son limitados, como suele ser el caso de las regiones de la última milla.
4. Elegir el método de electrificación: la planificación puede ayudar a decidir cuál de los tres modos de electrificación existentes (extensión de red, miniredes o SFA) es el más adecuado para cada territorio. Esto puede conseguir ahorros de coste de servicio, así como proporcionar los niveles de calidad adecuados a cada situación.
5. Promover la participación de la comunidad: la planificación puede promover la participación de la comunidad y permitir que las voces de los residentes locales sean escuchadas. Esto puede ayudar a garantizar que las soluciones propuestas sean culturalmente apropiadas y socialmente aceptables.

Esta planificación puede ser una tarea compleja e involucrar a múltiples actores. Durante esta fase, algunos factores que pueden condicionar su éxito son:

- Acceso a datos y análisis adecuados: la disponibilidad de datos precisos y análisis adecuados sobre la demanda de energía y la infraestructura eléctrica existente puede ayudar a los planificadores a tomar decisiones informadas sobre cómo y dónde invertir en la electrificación.
- Participación activa de la comunidad: la participación activa de la comunidad es crucial para el éxito de la planificación de la electrificación.
- Asignación adecuada de responsabilidades y recursos: permite llevar a cabo la electrificación de manera efectiva y sostenible.
- Enfoque en soluciones tecnológicas adecuadas: el uso de tecnologías adecuadas para la planificación es importante para la determinación de la solución de mínimo costo que asigna el modo de electrificación más adecuado para cada usuario.
- Como compromiso con el AUE priorizar la atención a los colectivos más desfavorecidos.

5.3. Asignación de responsabilidades

Como se ha mencionado previamente, la asignación de responsabilidades juega un papel importante en la determinación de una buena planificación, y posterior desarrollo de los proyectos. El Gobierno, mediante la determinación de la política energética del país, debe determinar los niveles iniciales **de acceso**, así como los criterios de fiabilidad y calidad de servicio que deben cumplirse a corto y largo plazo.

Del mismo modo, para la planificación del acceso universal a la electricidad, deben ser los Gobiernos quienes diseñen los planes y las administraciones locales y los actores de la electrificación los que propongan nuevas adaptaciones y desarrollos.

En Perú, el Plan Nacional de Electrificación Rural, cuyo objetivo es alcanzar el acceso universal a la electricidad de todos los peruanos, es actualizado anualmente y tiene un alcance a corto plazo de 3 años y a largo de 10 años. La competencia en materia de electrificación rural la tiene la Dirección General de Electrificación Rural (DGER), quién debe coordinar los gobiernos regionales y locales con empresas concesionarios de distribución eléctrica y de electrificación rural (DGER, 2020).

Una vez determinados estos objetivos de electrificación por parte del Gobierno, se recomienda que exista una única **unidad de planificación**, de modo que no existan funciones de planificación dispersas entre diferentes entidades. Esta misma entidad debe ser la encargada de determinar qué proyectos son viables. Por ejemplo, en Colombia existe la Unidad de Planificación Minero Energética (UPME), que es la encargada de formular de manera exclusiva los instrumentos de planificación del sector.

Una vez establecido el plan de electrificación, en la mayoría de los países, el sector eléctrico ha estado dominado por compañías eléctricas con licencias exclusivas para la distribución de electricidad en zonas administrativas, bajo un régimen de monopolio regulado. Gracias a la existencia de procesos de liberalización y privatización en muchos países, la propiedad de las empresas de distribución ha pasado a manos privadas, pero el régimen regulatorio sigue siendo el de un monopolio regulado para las actividades físicas de red.

En muchos países de América Latina, existen zonas donde se concentran consumidores sin acceso a la electricidad y que no han sido asignados a operadores de distribución, hecho que habilita entrada de cualquier operador bajo ciertas condiciones. Pese a que muchos países permiten la instalación de minirredes no conectadas a la red y la desconexión de conjuntos de clientes que eligen suministrarse por sí mismos, generalmente hay un operador con licencia de distribución en cada territorio del país (Eberhard & Godinho, 2017).

Sin embargo, en (Ortiz Jara, 2019) se debate que la falta de una organización estatal que responda al plan de Electrificación del Gobierno conlleva a que no se logre la viabilización de muchos proyectos. Se requiere que haya mayor coordinación entre las instituciones que llegan a las zonas no electrificadas.

Para ello, se recomienda que además de una única entidad planificadora exista otra entidad que sea la encargada de la **estructuración y ejecución** de los proyectos viables. Debe ser una entidad robusta y experta, que cuente con un área especializada en estructuración, es decir, organizar los proyectos que se van a llevar a cabo, tanto en contratación como en seguimiento de los proyectos.

Además, se recomienda que esta entidad cuente con un área dedicada al análisis de riesgos y entorno, dada su importancia para la viabilidad de los proyectos. Esta área se encargará de la relación con las comunidades desde la estructuración de las iniciativas. Tiene a su cargo conseguir la participación activa y positiva de los colectivos para un desarrollo adecuado de los proyectos.

Por último, se propone que la entidad cuente también con un área administrativa y financiera, de modo que se puedan recibir los proyectos y gestionar su financiación de una forma más eficiente. Esta medida se propone como una solución a corto y medio plazo, ya que se considera que a largo plazo las unidades encargadas de la estructuración y financiación de los proyectos podrían unificarse, pero esta modificación llevaría tiempo debido a los cambios legales que implica.

La estructura de esta entidad sería, por consiguiente, la siguiente:



Ilustración 55. Estructura entidad ejecutora proyectos (Ortiz Jara, 2019)

5.3. Herramientas de planificación integrada

Las herramientas para la planificación del acceso universal a la energía permiten determinar la mejor solución en términos técnico-económicos para electrificar una determinada región. El acceso a estas herramientas ha supuesto una revolución en la electrificación rural, dadas las ventajas que los sistemas de información geográfica (GIS), el acceso a bases de datos mejor georreferenciadas y los algoritmos avanzados de computación pueden aportar.

Existen diferentes herramientas de cálculo, entre las que destacan REM (desarrollado por el MIT/Comillas Universal Energy Access Laboratory), OnSSET (desarrollado por el Royal Institute of Technology, Suecia) y Network Planner (desarrollado por la Universidad de Columbia). A continuación, se describirá brevemente cada uno de estos modelos, así como la metodología GIS, y se mencionarán ejemplos en los que han sido empleados.

5.3.1. GIS - Geographic Information Systems

La metodología de exploración de datos y procesamiento GIS es una técnica que combina el procesamiento de datos geoespaciales y el análisis exploratorio de datos para comprender mejor los patrones espaciales y las relaciones en los datos.

Generalmente, la metodología comienza con la recopilación de datos geoespaciales relevantes, como mapas, imágenes de satélite, datos de sensores y otros datos geográficos. A continuación, se aplica un análisis exploratorio de datos para comprender mejor los patrones y las relaciones en los datos. Esto puede incluir técnicas estadísticas, como

análisis de correlación y regresión, así como técnicas de visualización de datos, como gráficos y diagramas. El análisis exploratorio de datos también puede implicar la identificación de patrones espaciales y la realización de análisis de clusters.

El uso de esta metodología en la electrificación rural permite la determinación de la situación y el perfil de los clientes individuales dentro del área de estudio. El procesado de imágenes por satélite permite identificar vectores de características de cada píxel que permiten estimar la localización y el área de cada edificio en cada imagen (ESRI, 2023)⁵⁴. Un aspecto que se tiene en cuenta a la hora de establecer la automatización del procedimiento es su coste computacional, incluyendo en la contabilidad el número y las dimensiones de las imágenes a procesar. Encontrar un equilibrio entre este coste y la tolerancia de errores es muy importante.

La siguiente imagen muestra a modo de ejemplo un mapa de la ciudad de Mashiki, Japón, donde la herramienta GIS ha sido empleada para estudiar los efectos del terremoto Kumamoto en los edificios de la misma. La primera imagen muestra una vista general de la ciudad, mientras que la segunda muestra en detalle la zona delimitada por el cuadrado.

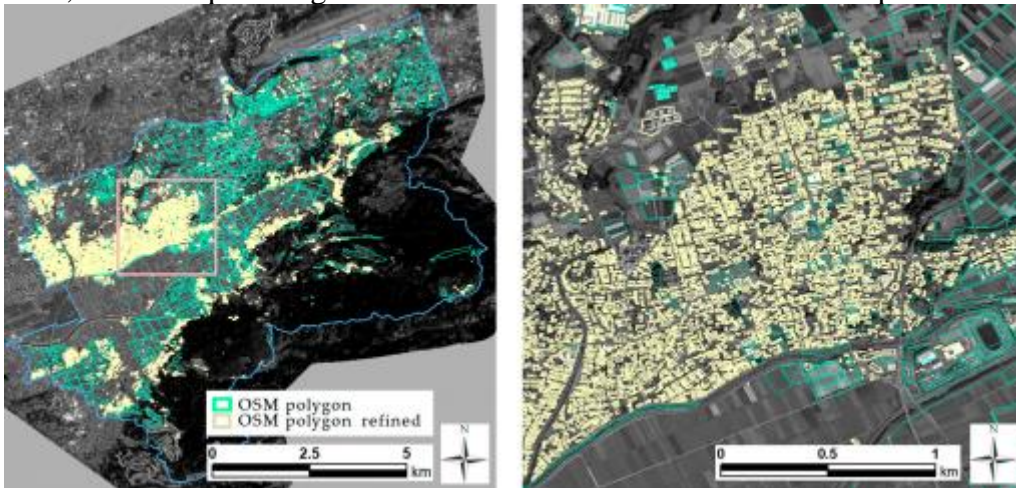


Ilustración 56. Mapa GIS Mashiki (Kushiyama & Matsuoka, 2019)

5.3.2. Modelo REM – Reference Electrification Model

El REM es una herramienta de planificación que utiliza una metodología de modelado de sistemas integrados⁵⁵ para estimar la demanda de energía eléctrica y diseñar sistemas de electrificación que permitan alcanzar el acceso universal a la electricidad. El modelo tiene en cuenta factores geográficos, demográficos, económicos y tecnológicos para diseñar una solución de electrificación adecuada. Puede ser aplicable tanto a localidades pequeñas como a todo un país y permite modificar fácilmente las hipótesis iniciales. Los resultados se basan en una combinación de datos del terreno, hipótesis y decisiones estratégicas, y por ello se recomienda que sea utilizado juntamente con las agencias líderes y los departamentos de planificación involucrados en el proyecto en cuestión.

La metodología del REM se divide en tres fases principales (Ciller et al, 2019):

⁵⁴ En el siguiente enlace se pueden observar ejemplos de mapas GIS: <https://doc.arcgis.com/en/what-is-gis/showcase/>

⁵⁵ La metodología de modelado de sistemas integrados es un enfoque sistemático para diseñar y desarrollar sistemas complejos, que se basa en la descomposición del sistema en componentes más simples, su modelado individual y su integración para formar un modelo completo del sistema.

1. **Análisis de la demanda:** en esta fase, se estima la demanda de energía eléctrica de la población ubicada en la región en la que se va a implementar el sistema de electrificación. Para ello, se utilizan datos demográficos, socioeconómicos y de consumo energético para calcular la demanda actual y futura de energía eléctrica. Precisamente es en esta parte donde REM se diferencia de otras herramientas de cálculo. Su principal ventaja es que opera con el máximo nivel posible de granularidad (consumidor o casa), mientras que el resto de modelos cuentan con un nivel de detalle inferior (aldeas, pueblos o celdas GIS).
2. **Diseño del sistema:** una vez estimada la demanda, se procede al diseño del sistema de electrificación. En esta fase, se seleccionan las tecnologías y las fuentes de energía adecuadas para cubrir la demanda de energía eléctrica. El estudio tiene en cuenta los tres posibles modos de electrificación: extensión de red, minired o sistema aislado. El REM tiene en cuenta factores como la geografía, la infraestructura existente y las restricciones presupuestarias para diseñar una solución de electrificación óptima.
3. **Evaluación y optimización:** finalmente, se realiza una evaluación del sistema diseñado para determinar su rentabilidad y sostenibilidad. En esta fase, se consideran diferentes escenarios y se realizan simulaciones para determinar la solución más rentable y sostenible para alcanzar el acceso universal a la electricidad. Para ellos se utiliza un algoritmo de búsqueda que se mueve, entre los diferentes diseños que se presentan como candidatos, hacia la dirección que reduce el coste final de estos diseños. El algoritmo tiene en cuenta tanto el coste de inversión y operación, como una penalización social proporcional a la parte de la demanda que no se satisface.

En general, el REM ha sido utilizado en diferentes países de todo el mundo para diseñar soluciones de electrificación rentables y sostenibles, como por ejemplo en Guatemala, Uganda, Nigeria o Tanzania, entre otros. También ha sido empleado en colaboración con el Banco Mundial para el desarrollo del plan Nacional de Electrificación de Ruanda⁵⁶ y el estudio del Plan de Acceso Universal a la Energía en Mozambique.

Las siguientes imágenes muestran el resultado de REM para el distrito de Vaishali, India. Los colores representan:

- Negro: líneas de medio voltaje existentes actualmente.
- Verde y rojo: miniredes.
- Naranja: SFA.
- Azul: extensión de red.

La primera imagen conduce a todos los sistemas fuera de red, a menos que haya una red más confiable. La agrupación de la extensión de la red incluye la comparación de miniredes, mientras que en el segundo caso esta comparación no se incluye. Por consiguiente, la segunda lógica de agrupamiento conduce a una mezcla de sistemas fuera de la red y extensiones de red. Las diferencias entre las áreas que reciben extensiones de red y sistemas fuera de la red varían, pero no de manera directa.

⁵⁶ Más información: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/69907>

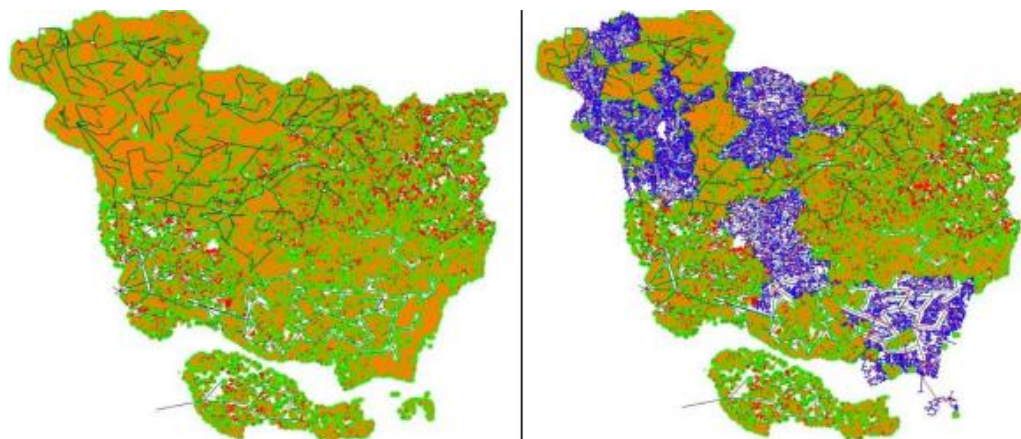


Ilustración 57. Resultados REM demanda base (Ellman, 2009)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos si se considerase un aumento de demanda.

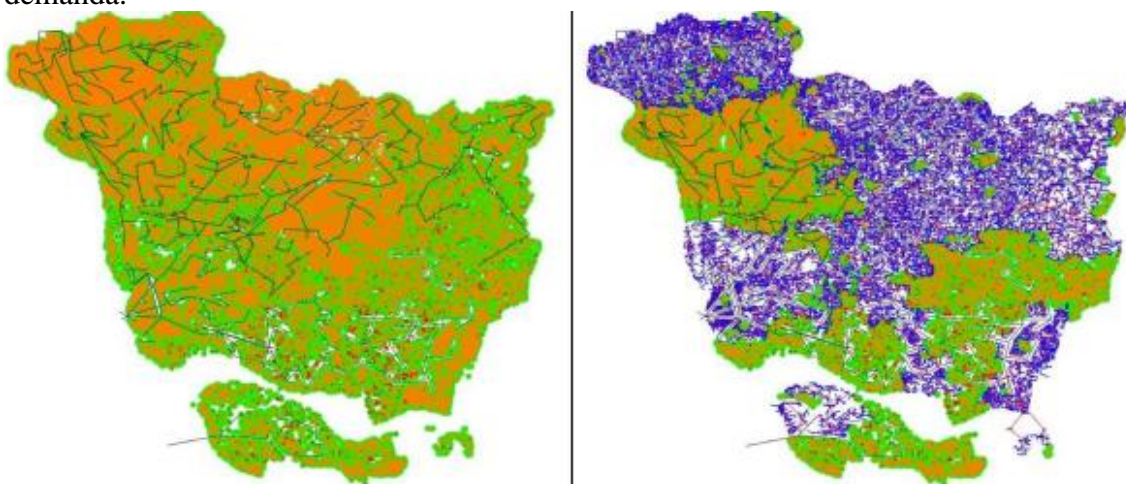


Ilustración 58. Resultados REM considerando un aumento de demanda (Ellman, 2009)

5.3.3. OnSSET - Open Source Spatial Electrification Tool

El modelo OnSSET es un modelo de planificación de energía que se utiliza para evaluar el acceso y la expansión de la electrificación en países en desarrollo y áreas remotas. OnSSET fue desarrollado por KTH Royal Institute of Technology en Suecia y se utiliza en muchos proyectos de energía en todo el mundo. Su desarrollo ha sido apoyado y financiado por entidades como el Banco Mundial, a través de su programa ESMAP, o el programa de desarrollo de las Naciones Unidas (PNUD) (Sahlberg et al, 2020).

OnSSET es un modelo de planificación energética que utiliza información geoespacial (GIS) para identificar las áreas que tienen una baja accesibilidad energética y evalúa la viabilidad de las diferentes tecnologías de electrificación para satisfacer las necesidades energéticas de la población. A diferencia del modelo REM, sus datos de entrada se basan únicamente en la metodología de exploración de datos y procesamiento GIS a nivel de celda, sin llegar a un nivel de exactitud superior (Sahlberg et al, 2020).

Este modelo es de código abierto y puede ser utilizado por cualquier persona. Se utiliza comúnmente en proyectos de electrificación en países en desarrollo como Afganistán,

Nigeria, Etiopía, Kenia, India, Tanzania, Madagascar y Benín. Además, OnSSET ha sido destacado en varias publicaciones revisadas por expertos, incluyendo la Perspectiva Energética Mundial en 2014, 2015, 2017 y 2019. [Citar referencia](#)

Un proyecto importante que usa el modelo OnSSET actualmente es la Plataforma de Electrificación Global (Global Electrification platform, GEP). Se trata de una plataforma de acceso abierto e interactiva que permite acceder a una visión general de los escenarios de inversión en electrificación para una selección de países. El objetivo de estos escenarios es conseguir el acceso universal a la electricidad en 2030 (GEP, 2023).

Los usuarios pueden acceder a un total de 96 escenarios diferentes que permiten alcanzar las metas de electrificación. Se trata de una plataforma desarrollada por el Banco Mundial. Una vez seleccionado el escenario requerido por el usuario, la plataforma da como resultado las nuevas conexiones y la inversión necesaria para conseguir el 100% de electrificación en 2030 en el país seleccionado.

La siguiente imagen muestra los resultados obtenidos para Uganda:

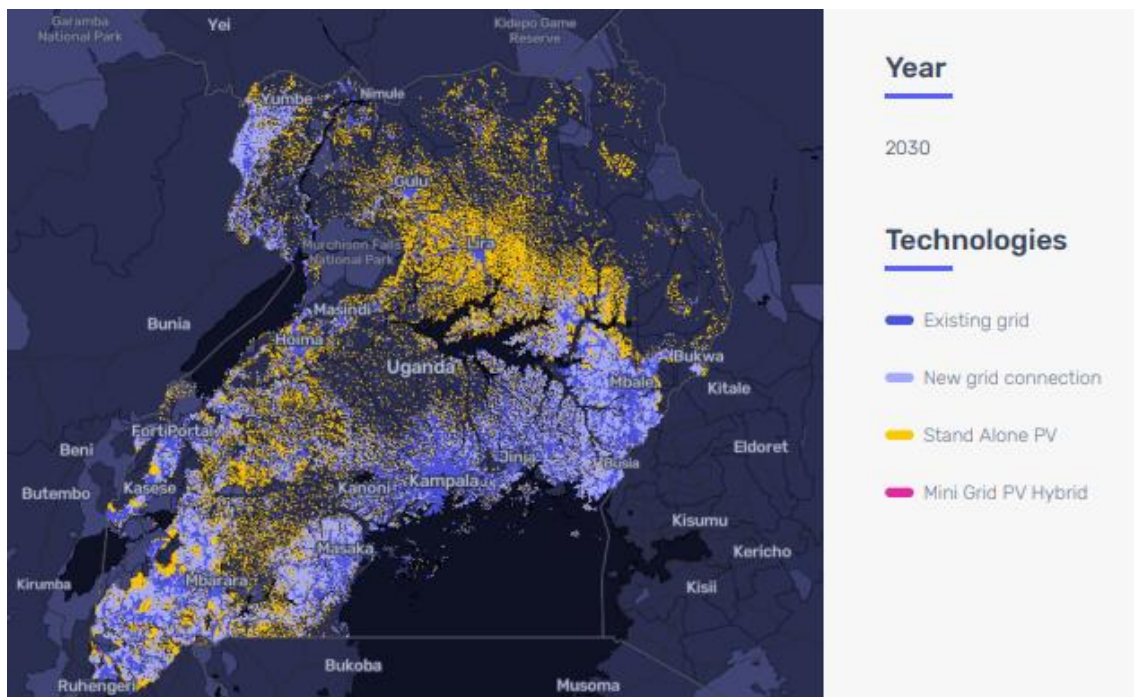


Ilustración 59. Resultados GEP Uganda (Fuente: GEP)

5.3.4. Network Planner

El modelo Network Planner fue creado por la Universidad de Columbia y originalmente desarrollado para la planificación de redes de telecomunicaciones.

Actualmente se utiliza para planificar tanto la extensión de red, como sistemas fuera de red (MR y SFA). La herramienta toma como datos de entrada una gran variedad de información, incluyendo la distribución geoespacial de la población (GIS), los costos de las tecnologías de energía, la demanda de electricidad y el crecimiento de la población, dando como resultado la opción de menor coste (Columbia, 2017).

El artículo "Electrification planning using Network Planner tool: The case of Ghana"⁵⁷ describe el uso de este modelo en la electrificación de Ghana. El estudio destaca la importancia de una planificación cuidadosa y estratégica de la electrificación para mejorar el acceso a la electricidad en zonas rurales y remotas.

El artículo comienza presentando un análisis de la situación energética de Ghana y destaca los desafíos que enfrenta el país en términos de acceso a la electricidad. A continuación, describe el modelo Network Planner y cómo se utiliza para planificar la expansión de la red eléctrica en áreas rurales y remotas. En este caso, el modelo se adapta para la planificación de la expansión de la red eléctrica. El modelo utiliza datos de entrada como los que se han visto en otras plataformas previamente presentadas: topografía, densidad de población, infraestructura existente, costes asociados a la construcción de nuevas líneas....

El estudio presenta los resultados de la aplicación del modelo Network Planner en tres regiones de Ghana y muestra cómo el modelo ayudó a identificar las áreas con mayor demanda de electrificación y las mejores ubicaciones para la expansión de la red eléctrica. Los resultados del estudio sugieren que el uso del modelo Network Planner puede mejorar significativamente la eficiencia y la efectividad de la planificación de la electrificación en áreas rurales y remotas (Kemausuor, 2014).

57

Disponible en:
<https://qsel.columbia.edu/assets/uploads/blog/2013/09/EnergyForSustainableDevelopment-ElectrificationPlanningInGhana-KemausuorEtAl.pdf>

6. Usos productivos y consideraciones de género

6.1. Definición y problemática

Tal y como ya se ha mencionado a lo largo del trabajo, el principal objetivo que persigue la electrificación universal es la mejora de las condiciones de vida de las personas y su desarrollo económico. Esto último va ligado a la mejora de la eficiencia de los procesos productivos que permite la electrificación, tanto de aquellos ya existentes como de aquellos nuevos favorecidos por la aparición de la electricidad.

Pero, ¿qué se entiende actualmente por usos productivos? Tradicionalmente se consideraban en la definición aquellas tecnologías utilizadas en la agricultura o actividades comerciales o industriales. Sin embargo, hoy en día se consideran como usos productivos todos aquellos que permiten generar ingresos adicionales.

Por ejemplo, el acceso a la iluminación permite que una tienda pueda permanecer abierta durante más horas, por lo que puede aumentar de forma directa sus ingresos. Un estudio de GOGLA ha demostrado que, para un tercio de sus usuarios, el acceso a la iluminación les ha permitido aumentar sus ingresos en \$35 por mes (GOGLA, 2018).

Del mismo modo, se ha demostrado que el uso de equipos de alta eficiencia alimentados por sistemas fuera de red, como TVs o ventiladores, ha ayudado a microempresas a atraer a más clientes y, por consiguiente, aumentar sus ingresos. Por ejemplo, en Kenia, un empresario abrió una sala de cine en un pueblo utilizando un paquete de energía solar que incluía una pantalla plana de 32". Situado en una remota isla, este cine es el único punto de encuentro para docenas de aldeanos que vienen a ver noticias, películas y partidos de fútbol. El empresario ahora gana en promedio \$6 al día cobrando tarifas de entrada para las proyecciones. Con el dinero extra que está ahorrando, planea comprar su propio terreno y construir una casa para su familia (Stottlemyer, 2018).

Como se puede observar con este ejemplo, la generación de ingresos es la forma más eficaz de luchar contra la pobreza (ODS 1). De este modo, el consumo de electricidad para usos productivos permite configurar un círculo virtuoso que genera ingresos adicionales y reduce la pobreza. Todo esto conlleva un aumento del desarrollo económico de la zona.

Sin embargo, cabe destacar que existen diversas dificultades a la hora de poner en práctica este círculo virtuoso, que han hecho que muchos programas de usos productivos de la electricidad se hayan quedado en simples experiencias piloto.

Por ejemplo, una de las principales dificultades es el enfoque de las actividades productivas desde la electricidad, cuando esta última es un componente poco relevante de las actividades productivas. Es necesario que desde los programas de desarrollo económico se definan las necesidades energéticas de dichos proyectos. En lugar de centrarnos exclusivamente en programas de electrificación para usos productivos, se debería hacer hincapié en las necesidades eléctricas de los programas de desarrollo económico.

6.2. Niveles

A continuación, se van a diferenciar los diferentes niveles de usos productivos y sus condicionantes.

Nivel 1: Usos productivos derivados de la electrificación residencial

Tal y como se ha visto en secciones anteriores, la electrificación de viviendas y centros comunitarios, además de mejorar las condiciones de vida, puede generar ingresos y creación de empleo. La habilitación de centros de atención a usuarios, como por ejemplo centros locales donde se realizan los pagos por la disponibilidad de los equipos, o la capacitación de técnicos locales para la reparación y mantenimiento de los equipos, genera empleo y, por consiguiente, ingresos.

Por otro lado, si la puesta en marcha del programa se realiza con los subsidios adecuados, los gastos en que incurre el usuario por el nuevo servicio son inferiores a los gastos anteriores en energéticos alternativos, por lo que se generan beneficios directos.

Tal y como se ha explicado previamente, la posibilidad de tener acceso a iluminación permite que en las viviendas se disponga de más tiempo para realizar diversas actividades. Además, este hecho hace que sea posible desplazar las actividades domésticas hacia las horas sin luz natural, permitiendo que las personas puedan aprovechar al máximo las horas diurnas para realizar actividades productivas. Algunas personas dedican estas horas a intensificar actividades preexistentes, como ampliar el horario de venta de artículos, costura de prendas de vestir o elaboración de artesanía, mientras que otras realizan actividades para las que antes no tenían tiempo, como recoger leña en vez de comprarla. Además de la iluminación, disponer de electricidad permite potenciar los negocios mediante, por ejemplo, el enfriamiento de productos de venta. Del mismo modo, la electricidad permite la carga de teléfonos móviles, lo que posibilita un mayor acceso a la información que puede significar mayores ahorros económicos.

Como se puede deducir, la generación de estos ingresos adicionales depende en gran medida de la iniciativa de los usuarios. Esta iniciativa se puede promover y motivar a través de la capacitación de los usuarios que debe acompañar al programa de electrificación. La iniciativa de los usuarios permitirá que los ingresos sean mayores o menores, pero en ningún caso deben obviarse.

Nivel 2: Usos productivos estandarizados

Los usos productivos más comunes en zonas rurales como lo son las regiones de la última milla se pueden encontrar en el procesamiento agrícola y ganadero, diversas industrias manufactureras y en el sector servicios.

El uso de productos estandarizados para estos casos ha permitido que se facilite el proceso de selección de equipos adecuados, de tal modo que se utilice el equipo más apropiado en función de las características de la demanda. Al tratarse de soluciones micro, las necesidades pueden satisfacerse con equipos estandarizados.

Los usos productivos basados en equipos solares dependerán del contexto geográfico y la economía de la región. Los más típicos son los siguientes:

- Procesamiento agrícola: bombeo de agua para riego, molienda de grano y secaderos.
- Procesamiento ganadero y pesca: cercas solares (boyeros) y congeladores.
- Industrias manufactureras: confección, herramientas para elaboración artesanía, carpintería y soldadura.
- Servicios: iluminación de comercios y sistemas de refrigeración.

El proveedor del servicio de electricidad debería facilitar el uso de estos equipos mediante la venta a través de los Centros de Atención al Usuario o equivalentes. Existe la posibilidad de que puedan estar subvencionados, de modo que se facilite el desarrollo económico local.

Nivel 3: Usos productivos específicos

Tal y como se ha mencionado previamente, los usos productivos anteriores pueden satisfacerse con equipos estandarizados dado que se trata de soluciones a pequeña escala. Sin embargo, cuando se consideran usos mayores, como el tratamiento del café o la transformación de productos agrícolas o ganaderos, se requiere una solución eléctrica concreta para cada uno de ellos.

Además, los usos productivos de mayor tamaño requieren de otros condicionantes como telecomunicaciones, servicios de apoyo locales, acceso a mercados... que pueden llegar a ser más importantes que el suministro eléctrico.

6.3. Equipos

La iniciativa PULSE (Productive Use Leveraging Solar Energy), desarrollada por el Banco Mundial, pretende recoger la evolución de los usos productivos de la electricidad en las comunidades rurales aisladas, así como los equipos que son empleados para ello. La mayoría de las regiones de la última milla se caracterizan por depender en mayor o menor medida del sector primario. Dado que muchos pequeños agricultores no pueden permitirse acceder a la electricidad, en muchas ocasiones sus actividades todavía no están mecanizadas y sus rendimientos son, por consiguiente, mínimos.

Por este motivo, el desarrollo de equipos para el nivel 2 de usos productivos relacionados con la agricultura es crítico en las regiones de la última milla. La innovación de estos equipos ha aumentado, pero todavía se requieren muchos avances para conseguir reducir los costes y adaptar los productos a los agricultores.

La electrificación del sector primario puede conseguir ventajas como mejorar la seguridad alimentaria, aumentar la productividad de las granjas, crear empleo e impulsar el desarrollo socio-económico (Lighting Global, 2019). Un aumento del 10% en la productividad agrícola para los agricultores de pequeña escala en África conduce a una reducción del 7% en la pobreza (Efficiency for Access, 2023a). Además, es una herramienta clave para apoyar a las personas más vulnerables contra los efectos del cambio climático.

Los equipos para usos productivos que se van a estudiar en este capítulo son las bombas de agua, las cadenas de frío, los molinos solares y las cercas electrificadas. Entre ellos, las **bombas de agua** son actualmente las más escalables. Las **cadenas de frío** pueden jugar un papel clave en la agricultura moderna de estos territorios, pero como se verá más adelante, son todavía relativamente caras, al igual que los **molinos solares**. Hay otras muchas aplicaciones en la agricultura que pueden mecanizarse, sin embargo, en ocasiones su coste todavía no es competitivo con las alternativas que usan diésel. En los últimos años están emergiendo otras aplicaciones que utilizan energía solar para abordar tareas específicas como incubar huevos, mantequeras o despulpadoras de café (Lighting Global, 2019).

6.3.1. Bombas de agua

Aproximadamente, el 95% de las tierras agrícolas del África subsahariana y el 60% de las del sur de Asia dependen de la impredecible lluvia estacional para hacer frente a sus necesidades de agua. Las bombas de agua solares ofrecen una solución de riego limpia, que pueden aumentar el potencial y el rendimiento de los cultivos. Concretamente,

pueden ser un factor crítico de crecimiento económico y de seguridad para más de 500 millones de pequeños agricultores en todo el mundo (Efficiency for Access, 2021).

Según un estudio⁵⁸ realizado por Efficiency for Access⁵⁹, el 78% de los encuestados utiliza las bombas de agua para usos agrícolas, mientras que un 22% lo hace para domésticos. Entre los que le dan el primer uso mencionado, un 76% regaba previamente sus cultivos de forma manual o con bombas movidas por motores diésel. Un 68% de los encuestados depende de la agricultura como fuente primaria de ingresos, dato que demuestra la relevancia de estos equipos en las regiones de la última milla.

Sin embargo, cabe destacar que este estudio ha demostrado que un 73% de los encuestados ha encontrado dificultades a la hora de buscar alternativas para sus bombas de agua. Desde 2019, la proporción de encuestados que cree que podría encontrar fácilmente una buena alternativa a su bomba de agua se ha triplicado, lo cuál indica que los esfuerzos están encaminados en la buena dirección pero que todavía hace falta llevar a cabo muchas campañas de concienciación que pongan de manifiesto las ventajas de estas soluciones.

Concretamente, el estudio demostró que un 45% de las personas accedió a su equipo gracias a la información que recibió de amigos o familiares. En el 81% de los casos, fue el hombre en solitario quien decidió adquirir el equipo, mientras que en tan solo un 15% la mujer, y en un 4% los dos juntos. Esto lleva a tener en cuenta las consideraciones de género, que serán debatidas posteriormente (Efficiency for Access, 2021).

Entre los factores que influenciaron en la compra del equipo destacan por orden de relevancia los siguientes:

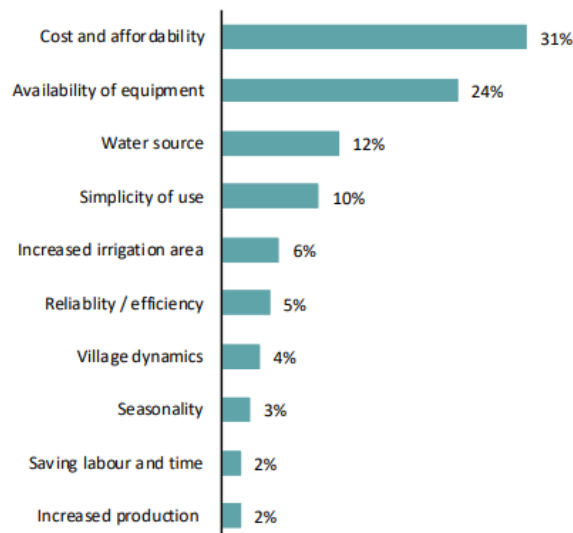


Ilustración 60. Factores que afectan la compra de una bomba de agua (Efficiency for Access, 2021)

Como se puede observar, el factor que tiene mayor peso en la decisión es el coste. Sin embargo, cabe destacar que existen estudios que demuestran que pese a tener un coste inicial más alto (de hasta el 60%), la compra de una bomba de agua solar puede ser más rentable que una de diésel en el primer año. El siguiente gráfico muestra este payback y los costes que se han supuesto para su cálculo:

⁵⁸ <https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/Use-and-Impacts-of-SWPs-July-2021-v2.pdf>

⁵⁹ Estudio realizado a 1.193 usuarios de bombas de agua en Kenia, Ruanda, Senegal, Tanzania, Uganda y Zambia.

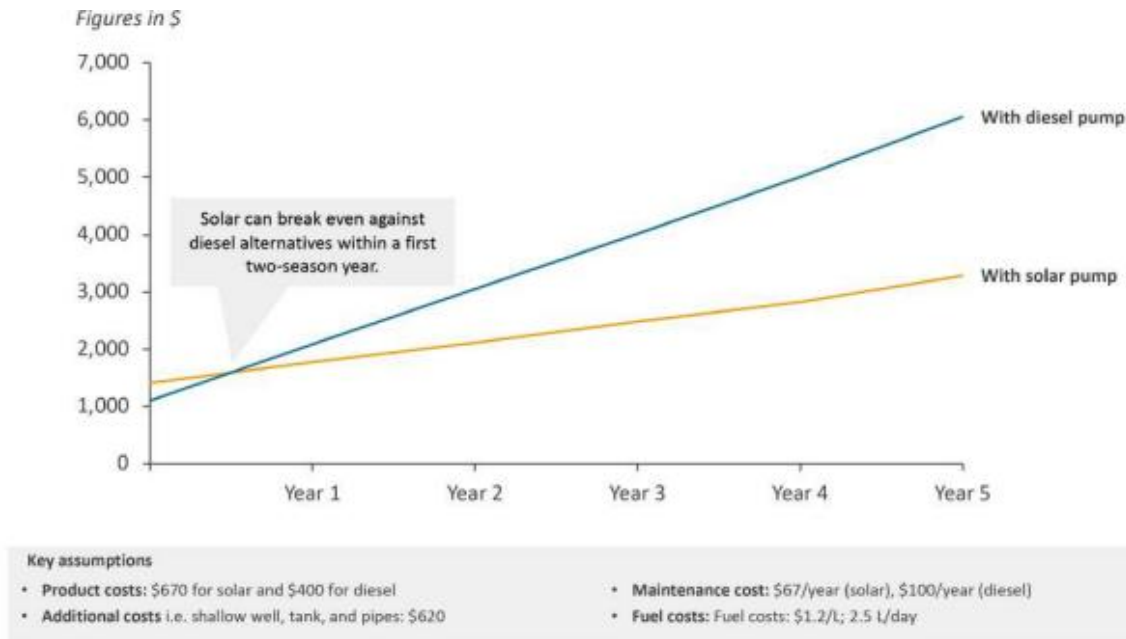


Ilustración 61. Payback de bomba diésel versus bomba solar en Kenia (Lighting Global, 2019)

Si el agricultor ya posee una bomba diésel, el payback de cambiar a una solar puede ser de tres o cuatro años, pero a largo plazo tiene ventajas económicas.

6.3.2. Cadena de frío

Las cadenas de frío son las responsables de controlar la temperatura de los productos perecederos desde su origen hasta su destino final, asegurando la calidad y la seguridad en la cadena de suministro. Se trata, por consiguiente, de cadenas de actividades logísticas que enfrían y conservan los alimentos.

Una cadena de frío bien diseñada puede prevenir pérdidas de alimentos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con el desperdicio de alimentos. Como se puede suponer, juegan un papel muy importante en la mejora de los resultados de las economías basadas en la agricultura. Si se lograra establecer cadenas de frío tan extensas y confiables como las que existen en los países industrializados, se podría aumentar el suministro de alimentos en un 15% en los países en desarrollo (Efficiency for Access, 2023a).

Los SFA son esenciales para millones de agricultores de pequeña escala que carecen de acceso a una red eléctrica confiable necesaria para alimentar sus tecnologías de cadena de frío. Sin embargo, estos agricultores operan con márgenes ajustados y la necesidad de enfriar sus productos supone un reto para muchos de ellos. Es por este motivo que se debe tratar que los equipos de enfriamiento sean asequibles, de modo que agreguen valor y sean rentables para el agricultor. La tecnología PAYG puede ayudar a garantizar la asequibilidad de estos equipos (Efficiency for Access, 2023b).

Cabe destacar la labor de la organización SelfChill⁶⁰, cuya dedicación ha sido galardonada con el premio a la mejor solución de enfriamiento alimentada con un sistema solar en

⁶⁰ <https://selfchill.org/>

2023. Esta organización se dedica a diseñar productos de enfriamiento para agricultores con pocos recursos que habitan en comunidades rurales aisladas.

6.3.3. Molino solar

Para muchas regiones de la última milla que dependen de los cereales como principal cultivo alimentario, la molienda es una actividad crucial. Los molinos de diésel se utilizan para sustituir la molienda manual. Estos, tiene un coste inicial relativamente bajo y una cadena de suministro bien desarrollada para su reparación y mantenimiento. Sin embargo, son difíciles de manejar, menos fiables que los eléctricos y en ocasiones están ubicados lejos de sus usuarios. Esto aumenta la carga de trabajo de mujeres y niños, que suelen ser los encargados del procesado de los alimentos.

Existen diversas alternativas a los molinos de diésel, entre ellas los molinos solares, alimentados por SFAs. El uso de baterías en estos sistemas es opcional, dado que los molinos pueden funcionar con paneles fotovoltaicos directamente sin baterías. Las siguientes imágenes muestran una estructura orientativa de los dos modos de funcionamiento:



Ilustración 62. Esquema diseño molino solar con batería (Efficiency for Access, 2020)

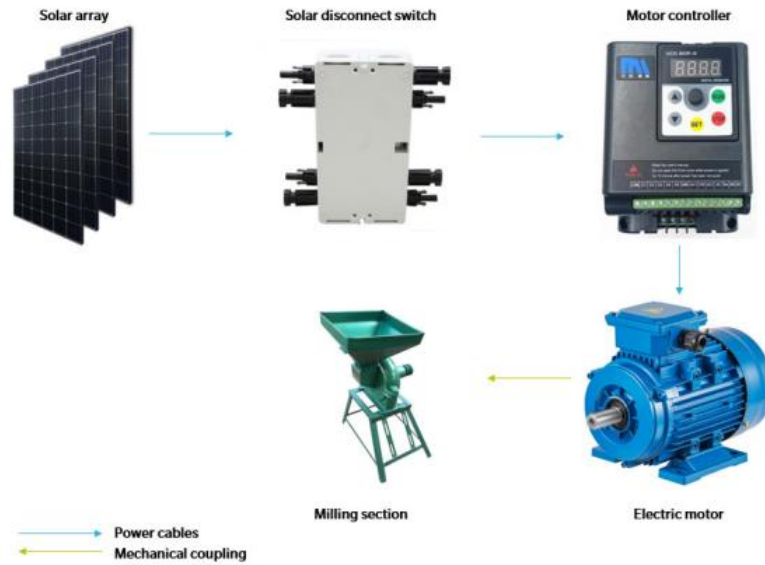


Ilustración 63. Esquema diseño molino solar sin batería (Efficiency for Access, 2020)

Como se puede deducir, los diseños que cuentan con baterías permitirán el uso del sistema solar para otros servicios fuera de las horas de trabajo, como la carga de teléfonos o baterías, lo que puede atraer a más clientes. Esto puede generar ingresos adicionales para el propietario que ayuden a reducir el periodo de amortización del equipo.

Por el contrario, el uso de un sistema de accionamiento directo (sin batería), puede ser desafiante dado que el rendimiento de un molino no se puede variar para que coincida con la energía disponible en un momento dado. Una baja insolación puede hacer que el molino se detenga, dado que la molienda tiene un requisito mínimo de energía. En cambio, el uso de baterías favorece el funcionamiento confiable de un molino. En la comparación entre un molino solar y uno diésel caben destacar sus costes y sus eficiencias, las cuáles se resumen en la siguiente tabla:

Tecnología	Eficiencia	Coste de la energía
Diésel	0,14 kWh/kg	USD 0,18/kWh
Solar	0,04 kWh/kg	USD 1,9/kWh

Tabla 14. Comparación molino diésel y solar (Efficiency for Access, 2020)

La eficiencia de los molinos solares todavía puede aumentar más si se utilizan motores de última generación, se mejora el diseño de los molinos y se dimensiona adecuadamente el sistema solar según el caso de uso.

El coste de estos molinos es significativamente más elevado, dado el coste inicial del sistema solar, las baterías y el balance del sistema.

Concretamente, la inversión en un molino solar puede no alcanzar el punto de equilibrio con el molino diésel hasta el año 9, que es el final de la vida útil de las secciones de molienda de ambos molinos. Sin embargo, cabe destacar que los componentes del molino solar con el motor y los paneles fotovoltaicos podrían ser reutilizados, estando aún dentro de su vida útil.

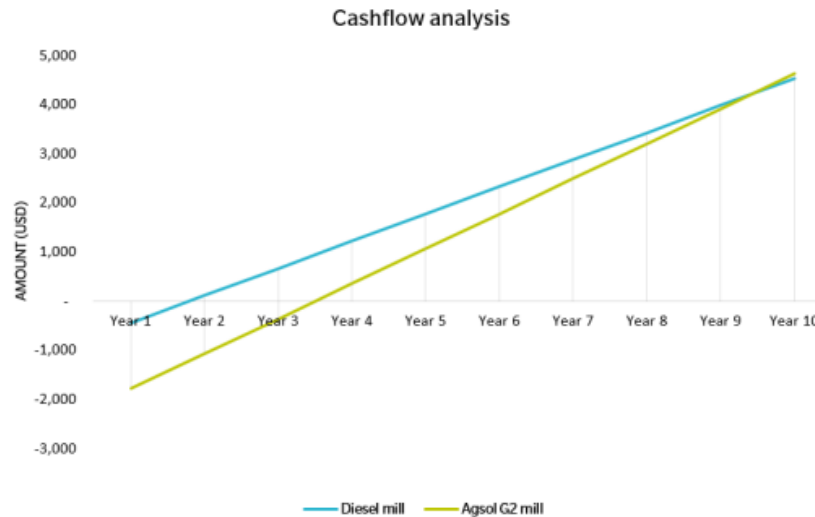


Ilustración 64. Análisis punto de equilibrio molino solar y diésel (*Efficiency for Access, 2020*)

Por este motivo, el método de financiación empleado por el usuario para adquirir un molino solar es crucial. Como se ha visto con el uso de otros equipos, la tecnología PAYG es el modo preferido de gran parte de los habitantes de la última milla para acceder a este tipo de sistemas. Esta tecnología permite reducir el riesgo a la hora de adquirir los equipos, convirtiéndolos por consiguiente en más asequibles.

Pese al uso de esta tecnología, los molinos solares alimentados por SFAs todavía no son económicamente viables comercialmente, ya que no cumplen con los requisitos que les permiten competir con los molinos de diésel establecidos. Aunque sus costes operacionales son más bajos, su coste inicial es todavía una barrera muy alta que impide el desarrollo del mercado de estos molinos. La compatibilidad entre el molino y el SFA es determinante para la eficiencia del sistema, característica que junto con la concienciación a los usuarios acerca de sus ventajas puede desbloquear una mayor demanda.

6.3.4. Cercas electrificadas

El uso de cercas electrificadas conlleva grandes beneficios, entre los que cabe destacar una mayor eficiencia del ganado. Permiten aumentar la cantidad de animales por hectárea y la delimitación de potreros, evitando el sobrepastoreo y el consecuente agotamiento de la oferta nutricional de los suelos.

Además, son más seguras y efectivas que las cercas tradicionales, evitando la fuga de animales.

Por otro lado, gracias a su uso se puede reducir hasta en un 50% los costos de insumos y de mano de obra (NotiAgro, 2013).

6.4. Consideraciones de género

En las comunidades rurales aisladas, las mujeres suelen asumir el cuidado y las tareas domésticas. Un estudio realizado en Guatemala demostró que las mujeres emplean de media entre 8 y 11 horas al día en actividades relacionadas con la energía, como buscar agua, leña limpiar y cocinar, mientras que los hombres entre 1 y 2 horas (Lambrou & Piana, 2006). Es por esto motivo, que la electrificación domiciliar impacta en mayor medida en ellas.

Por consiguiente, los proyectos de electrificación deben ser transformadores hacia una situación de equiparación. Las mujeres deben formar parte y participar en los proyectos de sensibilización y de toma de decisiones en el proceso de electrificación, llegando a integrarse como técnicos locales. Es necesario incorporar un análisis de género en la planificación e implementación de los proyectos de electrificación para asegurar que los beneficios de la energía alcancen a toda la comunidad y que se maximice el impacto de dichos cambios.

Cabe destacar que las grandes desigualdades de género que existen en las comunidades rurales aisladas no pueden solventarse únicamente con tener acceso a la energía, si no que debe ir acompañado de otras medidas, como facilitar el emprendimiento. De este modo, se agrega otro ámbito de oportunidad para las mujeres que pueden aumentar su poder de negociación en el hogar, permitiéndoles empoderarse y tomar decisiones reales (Smart Villages, 2015).

Aunque la provisión de energía no necesariamente conduce a una mayor igualdad en los roles de género, es importante mencionar que puede aliviar algunos de los aspectos más pesados y perjudiciales de su vida diaria y ampliar las opciones de desarrollo disponibles para las mujeres, sus familias y sus comunidades (ENERGIA, 2019).

El acceso universal a la energía no puede conseguirse sin que las políticas que lo permiten estén alineadas con las necesidades energéticas de tanto hombres como mujeres. Los hombres y las mujeres tienen necesidades energéticas diferentes, y diferentes niveles de acceso y control sobre fuentes de energía y tecnologías. Las políticas energéticas que busquen obtener beneficios iguales para hombres y mujeres deben considerar esta diferenciación (ENERGIA, 2019).

Pero ¿cuáles es el impacto que tiene el acceso a la electricidad para hombres y mujeres? La principal causa de la falta de autonomía económica de las mujeres y su dificultad para acceder a actividades remuneradas es la división del trabajo (United Nations, 2014). Como se ha mencionado previamente, esta división hace que la mujer sea la encargada de cargar con las tareas domésticas, lo que le impide tener tiempo para dedicarlo a su educación. La educación y el trabajo remunerado pueden ser clave para mejorar el estatus de las mujeres. La electricidad puede proporcionar este tiempo necesario, siendo el mayor impacto que el acceso a la energía tiene en las mujeres (Lambrou & Piana, 2006).

Algunas de las principales áreas de trabajo donde la energía puede marcar una diferencia significativa en tiempo son la recolección de leña y agua, preparación de alimentos y el transporte.

1. Recolección de leña

En las comunidades de la última milla, la leña puede emplearse por muchas razones, entre ellas cocinar o calentarse. Un estudio realizado en Bután demostró que el tiempo dedicado a esta recolección de leña se reducía sustancialmente con la electrificación, dado que el cocinado eléctrico y el uso de estufas reducían la necesidad de leña. En concreto, el ahorro de tiempo para las mujeres fue un 34% superior que para los hombres (ADB, 2010).

2. Recolección de agua

En las zonas donde no se dispone agua por bombeo, las mujeres y niños son los encargados de ir a buscarla a los lagos y ríos más cercanos. Las mujeres en África subsahariana pasan "40 mil millones de horas al año recolectando agua, lo cual equivale a un año completo de trabajo de toda la fuerza laboral en Francia (Rojas et al, 2011). En las regiones donde la agricultura se ve afectada por las variaciones de agua, las bombas de agua solares no solo reducen la fatiga de las mujeres, sino que también pueden contribuir a un aumento de la actividad económica y a mejores condiciones de salud y vida. Además, pueden mejorar las habilidades de las mujeres para que puedan ser capaces de controlar actividades agrícolas por ellas mismas (Smart Villages, 2015).

3. Preparación de alimentos

Según la FAO (Food and Agriculture Organisation), más del 70% de las mujeres económicamente activas en los países menos desarrollados trabajan en la agricultura (MRF CJ, 2012). Las mujeres producen entre el 60 y el 80% de los alimentos en la mayoría de los países en desarrollo (Energía, 2019). Esto pone de manifiesto que el uso de nuevas tecnologías en el sector de la agricultura podría conllevar reducciones en las cargas de trabajo de las mujeres. Además, produciría un aumento en la productividad. Tal y como ya se ha comentado previamente, ampliar el acceso de las mujeres a recursos y actividades que generen mayores ingresos puede también aumentar su poder de negociación en el hogar.

4. Transporte

Mientras que la carga de los desplazamientos relacionados con la agricultura suele estar repartida entre hombres y mujeres, las mujeres son casi completamente responsables de todos los viajes domésticos (transporte de leña y agua principalmente). Estos, requieren de mucha energía y son los que más tiempo consumen en las áreas rurales, representando entre uno y más de dos tercios de todos los desplazamientos (Uteng, 2011). El uso de la electricidad puede por ejemplo permitir que se amplie la utilización de cocinas eléctricas, reduciendo la necesidad de recolectar leña, y consecuentemente el tiempo dedicado a su transporte.

7. Estudio Económico

El objetivo del presente estudio económico es analizar la viabilidad de ofrecer el servicio eléctrico a los habitantes de la última milla mediante sistemas fotovoltaicos aislados.

Para determinar si el proyecto es rentable se compararán los ingresos normalizados con el coste normalizado de la energía.

Por un lado, la normalización de los costes es uno de los aspectos que diferencia el estudio económico presentado en este trabajo con el realizado en el trabajo final de máster del MBA. Además, en este estudio económico se ha profundizado más en la determinación de los costes, considerando por ejemplo en los ingresos un descuento por la indisponibilidad de los equipos por reparaciones. Por otro lado, en el plan financiero del MBA se han presentado proyecciones de los costes y de los ingresos para los 20 años de vida del proyecto, y el VAN del mismo en cada uno de los años, valores que aquí no se presentan. El número de usuarios es también diferente en ambos trabajos.

7.1. Hipótesis

El estudio económico se realizará mediante el cálculo del coste y los ingresos normalizados. Se llevará a cabo desde el punto de vista del proveedor eléctrico.

Para el cálculo de los costes se tendrá en cuenta la Tarifa Eléctrica Rural para Sistemas Fotovoltaicos desarrollada en Perú⁶¹. Esta tarifa establece valores para los costes de mano de obra y transporte, entre otros, que se han tomado como referencia.

A continuación, se detallan las hipótesis que se van a realizar para el desarrollo del estudio económico:

- El estudio se desarrollará para la península Valiente (Panamá), teniendo como referencia los costes establecidos para la región de la Selva de Perú.
- La electrificación se realizará con Sistemas Fotovoltaicos de Tercera Generación (SFA3G) con sistemas pre-pago. El pago por parte de los usuarios se realizará a través de centros CAU, donde los usuarios podrán realizar el pago de sus tarifas y obtener los códigos que habilitarán el uso de sus equipos.
- En el estudio o que aquí se propone se incorporan módulos de 120Wp y 240Wp. El motivo de seleccionar estos módulos se debe a que durante el estudio del dimensionamiento de los equipos se ha comprobado que estos módulos permiten dar acceso a un nivel de servicio adecuado.
- El estudio contará con un subsidio del 70% sobre la tarifa que paga el usuario.
- El estudio supondrá una vida útil del proyecto de 20 años.
- Se supondrá la instalación de 500 equipos en total (400 de 120Wp y 100 de 240WP).
- La tasa nominal de incremento de los costes de operación será del 1% y el WACC del 8%. La tarifa eléctrica contará con una tasa nominal de proyección del 0,1%.

7.2. Coste Normalizado de la Inversión

El coste normalizado de la inversión (CAPEX) se calcula mediante la siguiente fórmula:

⁶¹ El informe donde se detalla el procedimiento de cálculo de la tarifa se puede encontrar en el siguiente enlace: <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/procesos-regulatorios/electricidad/tarifa-electrica-rural-sistemas-fotovoltaicos>

$$CAPEX = INV * fa$$

Donde INV representa la inversión inicial y *fa* se calcula con la expresión:

$$fa = \frac{WACC * (1 + WACC)^N}{(1 + WACC)^N - 1}$$

La inversión inicial (INV) Comprenden las inversiones en materiales y recursos (todo lo necesario para el montaje de los sistemas fotovoltaicos). La estructura de esta inversión se puede resumir en el esquema que se presenta a continuación:

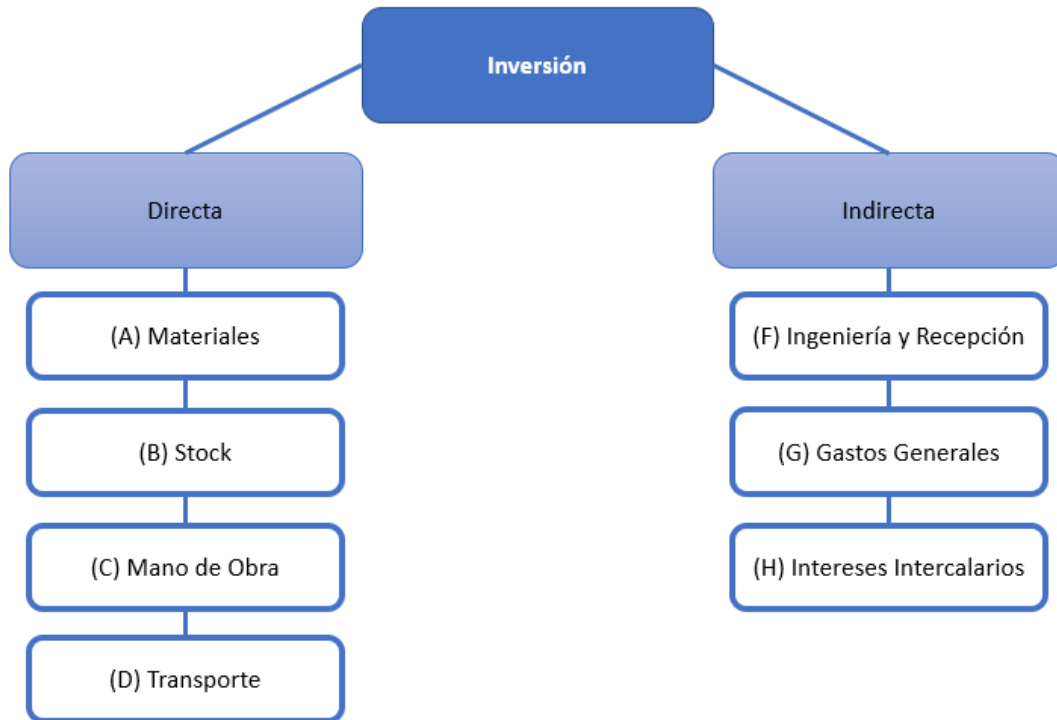


Ilustración 65. Estructura inversión (Elaboración propia)

A continuación, se especifica de qué se compone cada una de estas partidas.

- **(A) Materiales**

Engloba el coste de los elementos que forman los sistemas fotovoltaicos. En la siguiente tabla se muestran los elementos de los SFA3G, así como su proveedor y coste unitario:

Código de material	Descripción de equipo	Precio (US\$)	Proveedor
PAN - 1	Panel fotovoltaico – 12Vcc 120Wp	62,89	Zimpertec
SOP - 1	Módulo Soporte para panel fotovoltaico de 120Wp	28,73	SolarModul
SOP - 2	Módulo Soporte para panel fotovoltaico de 2x120Wp	30,59	Polmarg EIRL
BAT - 1	Baterías 25Ah, 320Wh con sistema de regulación	170,00	Zimpertec
BAT - 2	Baterías 50Ah, 640Wh con sistema de regulación	293,11	Zimpertec
CAB - 1	Kit de instalación	32,40	Zimpertec

Tabla 15. Precios materiales SFA3G (Elaboración propia)

- **(B) Stock**

Representa el coste de almacenamiento de los materiales (almacén, seguro y personal) y el coste del material inmovilizado en el stock de materiales necesarios para realizar cada instalación.

Para este ejemplo, se ha considerado que se dispondrá de un almacén en la península Valiente, desde donde se efectuará el reparto y almacenamiento de los equipos.

Siguiendo el modelo de **Osinergmin** en Perú, el coste de stock se calculará como un porcentaje del coste de los materiales. El coste incluirá la inversión de activo fijo (almacén), así como los costes de su operación y mantenimiento (personal, servicios, stock inmovilizado...).

El porcentaje del coste de stock seleccionado es del **6,81%**, de acuerdo con el valor que ha sido empleado por Osinergmin para el cálculo de la tarifa Rural Fotovoltaica en Perú.

- **(C) Mano de obra**

Se corresponde con los costes de mano de obra necesarios para desarrollar las distintas actividades que permiten la instalación de los sistemas fotovoltaicos autónomos. Los costes empleados se han basado en los presentados por Osinergmin en el informe técnico de la tarifa Rural Fotovoltaica para el periodo 2022-2026.

La siguiente tabla muestra los costes de horas-hombre por categoría:

Categoría	Costo hora-hombre (US\$/h-h)
Operario	4,85
Oficial	4,67
Peón	3,57

Tabla 16. Costes mano de obra (Elaboración propia)

En función de la tarea a realizar se requerirá de unas habilidades u otras. Para la determinación del coste de mano de obra para la instalación de los equipos se ha considerado que serán necesarios un oficial y un peón. El coste de mano de obra de la jornada laboral entera sería el siguiente:

Mano de Obra para Instalación				
Descripción	Unidad	Coste (US\$/Unidad)	Horas	Subtotal (US\$)
Oficial	h-h	4,67	8	37,36
Peón	h-h	3,57	8	28,56
TOTAL				65,92

Tabla 17. Mano de obra instalación (Elaboración propia)

En una jornada laboral se ha estimado que se podrían instalar 4 equipos.

- **(D) Transporte**

Se corresponde con el coste de transporte necesario para desarrollar la instalación de los SFA. Siguiendo el modelo de Osinergmin, los costes empleados han sido los definidos por el Sistema de Información de los Costos Estándar de Inversión de las Instalaciones

de Distribución Eléctrica (SICODI)⁶². A continuación, se presentan los costes de horas-máquina por categoría:

Categoría	Coste (US\$/h-m)
Camión 10Tn	14,27
Camión 4Tn	12,10
Camioneta	9,94
Moto	1,87
Deslizador⁶³	23,30
Pequeña embarcación	6,77

Tabla 18. Costes Transporte y Equipos (Elaboración propia)

Para determinar los costes de transporte concretos, se han estimado las horas de trayecto necesarias para llegar hasta la Península Valiente.

En primer lugar, se ha determinado el coste de ir desde la Ciudad de Panamá hasta David, localidad donde se ha considerado que se podrían distribuir los equipos. En el siguiente mapa se observa el trayecto a realizar y la tabla muestra el coste del mismo:

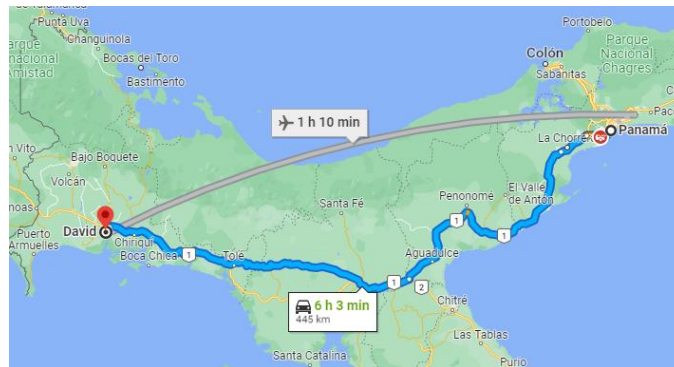


Ilustración 66. Trayecto Ciudad de Panamá-David (Fuente: Google Maps)

TRANSPORTE CIUDAD DE PANAMÁ - DAVID				
Descripción	Unidad	Coste (US\$/Unidad)	Horas	Subtotal (US\$)
Camión 10Tn	h-m	14,27	6	85,62

Tabla 19. Coste Transporte Ciudad de Panamá-David (Elaboración propia)

Por otro lado, se ha estimado el coste de alcanzar la península Valiente desde la ciudad de David. Se puede observar en la siguiente imagen y tabla:

⁶² Conjunto de herramientas y procedimientos utilizados para el cálculo y la gestión de los costos de inversión en las instalaciones de distribución eléctrica.

⁶³ Gran embarcación de rutas fijas.

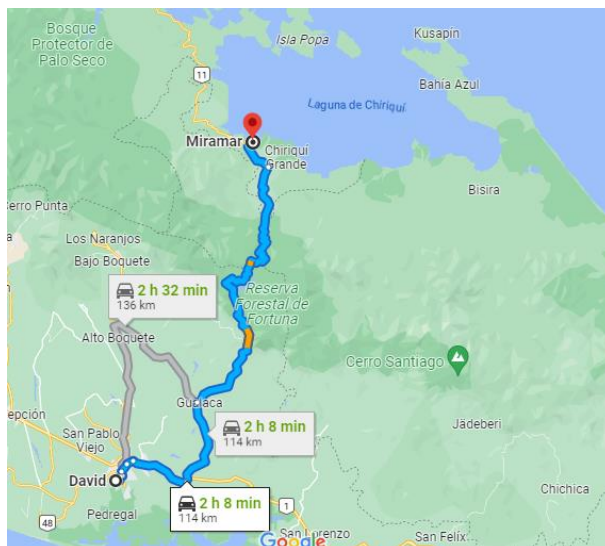


Ilustración 67. Trayecto David-Península Valiente (Fuente: Google Maps)

COSTE TRANSPORTE PARA INSTALACIONES, MANT. CORRECTIVO Y REPOSICIONES				
Descripción	Unidad	Coste (US\$/Unidad)	Horas	Subtotal (US\$)
Equipo-Deslizador	h-m	23,3	1	23,3
Transporte-Camioneta	h-m	9,94	4	39,76
TOTAL				63,06

Tabla 20. Coste transporte a Península Valiente (Elaboración propia)

Como se puede observar en la Ilustración 64, la península Valiente no es accesible por carretera. Es por ello, que para llegar será necesario el uso de una camioneta hasta Miramar, y desde allí un deslizador hasta la península Valiente. Para la instalación de los equipos se empleará una camioneta para el transporte, de modo que se puedan llevar todos los materiales necesarios. Este mismo coste será empleado en el cálculo del coste del mantenimiento correctivo y las reposiciones por agotamiento de la vida útil de las baterías.

- **(F) Ingeniería y Recepción**

Corresponde a los costes indirectos de ingeniería, supervisión y recepción de obras del proyecto. Se calculará como el **11%** del coste de obra (materiales, stock y recursos de mano de obra y transporte).

- **(G) Gastos Generales**

Representan los gastos administrativos e impuestos, de capacitación para usuarios de los sistemas fotovoltaicos y técnicos locales y los relacionados con la ejecución de las instalaciones.

El coste de capacitación se refiere al gasto que se realiza para que el usuario adquiera los conocimientos y habilidades necesarios para _instalar, operar y mantener el sistema fotovoltaico autónomo de manera segura y eficiente. La capacitación en sistemas fotovoltaicos aislados es esencial para garantizar la eficiencia, seguridad y durabilidad del sistema.

El coste de capacitación puede variar significativamente dependiendo del nivel de capacitación requerido y la ubicación geográfica del usuario.
El total de los gastos generales se establecerá como el **6%** de los gastos de obra.

- **(H) Intereses Intercalarios⁶⁴**

El costo de financiación de los sistemas hasta su puesta en servicio se calculará como un porcentaje sobre los costos de obra. Se ha establecido este porcentaje en el **2,5%**.

Con los datos establecidos y considerando la instalación de 4 SFA por día, se han obtenido los siguientes costes de inversión unitarios:

RESUMEN COSTES UNITARIOS (US\$)		
	Módulo 120Wp	Módulo 240Wp
Costos Materiales	302,4	490,3
Stock	20,6	33,4
Costos de Mano Obra	16,5	16,5
Costos de Transporte	16,1	16,1
Total Costes Obra	355,6	556,3
Ingeniería	39,1	61,2
Gastos Generales	21,3	33,4
Intereses Intercalarios	8,9	13,9
COSTE INVERSIÓN INICIAL UNITARIO	424,8	664,5

Tabla 21. Costes unitarios de inversión (Elaboración propia)

Dado que se instalarán 400 equipos de 120Wp y 240 equipos de 240Wp, el coste total de inversión será:

$$INV = 400 * 424,5 + 100 * 664,5 = 236.250 \text{ US\$}$$

Para calcular el CAPEX se desterminará en primer lugar el factor de anualidad:

$$fa = \frac{WACC * (1 + WACC)^N}{(1 + WACC)^N - 1} = \frac{8\% * (1 + 8\%)^{20}}{(1 + 8\%)^{20} - 1} = 0,1019$$

$$CAPEX = INV * fa = 236.354,6 * 0,1019 = \mathbf{24.063 \text{ US\$}}$$

7.3. Costes normalizados Fijos y Operativos

Los gastos anuales de proveer el servicio se dividirán en:

Costes Fijos

Los costes fijos se corresponden con aquellos que derivan de disponer de una oficina central desde donde coordinar todas las actividades llevadas a cabo por la empresa proveedora del servicio eléctrico.

⁶⁴ Compensación que reciben las personas que poseen participación en el capital o títulos de deuda de una sociedad que aún no ha entrado en funcionamiento.

En esta oficina trabajarán el gerente con el apoyo de un técnico. Se ha considerado que el sueldo horario del gerente debía ser más elevado que el del personal mostrado en la Tabla 16, por lo que este coste se ha estimado en 5,5US\$/h.

Además de los costes de personal, se han considerado los costes de oficina. Entre ellos destacan el coste de alquiler y suministros, así como de mantenimiento de la oficina y equipos.

Por otro lado, se ha tenido en cuenta el coste derivado de los viajes que realizará el personal para llevar a cabo las tareas de coordinación de la empresa proveedora del servicio, y otros costes como bancarios.

El resumen de estos costes mensuales se muestra en la siguiente tabla:

Costes fijos (US\$/mes)	
Alquiler Oficina+Luz+Agua	350
Servicio Telefónico + Internet	20
Servicio Telefónico móvil	15
Mano de obra (gerente + técnico)	1.440
Servicio de asesoría fiscal y tributaria	5
Mantenimiento oficina (limpieza)	40
Envío de correspondencia	25
Útiles de oficina	50
Útiles de limpieza	5
Impresiones	25
Movilidad local	40
Gastos bancarios	10
Viajes coordinación Ciudad de Panamá	50

Tabla 22. Costes Fijos mensuales (Elaboración propia)

El total de estos costes en el primer año de operación es de **24.900 US\$**.

Costes Operativos

Dentro de los costes operativos se engloban los siguientes:

- Mantenimiento preventivo y correctivo.
- Coste comercial.
- Recambio baterías por agotamiento vida útil.
- Rotación por impagos.

MANTEMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO

El mantenimiento preventivo hace referencia a aquel mantenimiento que se realizará regularmente en los sistemas con el objetivo de prevenir fallas y asegurar su correcto funcionamiento a largo plazo. Por el contrario, el mantenimiento correctivo se realizará después de que haya ocurrido una incidencia (falla o problema). El objetivo del mantenimiento correctivo será restaurar el equipo a su estado de funcionamiento normal, ya sea mediante la reparación o reemplazo de partes o componentes defectuosos.

El mantenimiento preventivo contará con las siguientes actividades:

Componente	Actividad	Frecuencia	Trabajadores
Panel Fotovoltaico	Inspección minuciosa del panel	Anual	Oficial
Batería	Inspección minuciosa de la batería	Anual	Oficial
Panel Fotovoltaico	Limpieza e inspección visual del panel	Semestral	Operario

Tabla 23. Actividades mantenimiento preventivo (Elaboración propia)

Cada una de las actividades tendrá asociado un coste de mano de obra y de transporte. En este caso y dado que no es necesario transportar grandes materiales, se empleará una moto para el transporte por carretera.

Los costes del mantenimiento preventivo por módulo instalado de pueden observar en la siguiente tabla:

RESUMEN COSTES UNITARIOS ANUALES (US\$)			
Actividad	Coste mano de obra	Coste Transporte	Total
Inspección minuciosa del panel⁶⁵	6,23	5,13	11,36
Inspección minuciosa de la batería			
Limpieza e inspección visual del panel	4,85	3,85	8,7
Total coste Preventivo unitario			20,05

Tabla 24. Costes Mantenimiento Preventivo por módulo instalado (Elaboración propia)

Teniendo en cuenta el total de módulos instalados, el mantenimiento preventivo tendría un coste de **10.027,1 US\$**.

Por el contrario, el mantenimiento correctivo se ha calculado en base a los siguientes criterios:

MANTENIMIENTO CORRECTIVO	
Tasa fallo anual kits	5%
Coste reparación materiales sobre la inversión	16%
Nº de reparaciones por día	1
Trabajadores	Oficial + Operario

Tabla 25. Criterios mantenimiento correctivo (Elaboración propia)

En este caso, el cálculo del mantenimiento correctivo incluirá un coste de mano de obra, de transporte y de los materiales que sea necesario arreglar.

Teniendo en cuenta estos criterios y los módulos instalados (500), el mantenimiento correctivo tendría el coste asociado siguiente:

⁶⁵ Se ha considerado que las inspecciones minuciosas del panel y de la batería pueden hacerse simultáneamente.

Número de kits con fallo/año	25
Coste Material	3.170,88
Coste Mano de obra	1.904
Coste transporte	1.576,5
TOTAL COSTE MANT.CORRECTIVO (US\$)	6.651,38

Tabla 26. Coste total mantenimiento correctivo (Elaboración propia)

El coste total de ambos mantenimientos será de **16.678,5 US\$**.

COMERCIAL

El coste comercial es aquel que deriva de recibir las tarifas pagadas por los usuarios y atender las llamadas por incidencias en los equipos. Estará compuesto por dos partidas diferentes:

- Coste del personal encargado de recibir estos pagos y atender las llamadas por incidencias de los usuarios.
- Coste de la aplicación que posibilita el uso de la tecnología PAYG.

La persona encargada de recibir los pagos y atender las llamadas será alguien que tenga un negocio local cerca de las zonas donde se instalen los equipos, y pueda dedicar parte de su tiempo a realizar las tareas comerciales. Se le pagará por las horas que dedique a ello. La estimación de este tiempo y coste se ha realizado con los valores que se muestran en la tabla:

COSTES COMERCIALES	
Salario empleado local (US\$/h)	4,5
Tiempo dedicad a usuario que paga (min.)	15
% llamadas por incidencia (diario)	1%
Tiempo por llamada (min.)	15

Tabla 27. Coste comercial mano de obra (Elaboración propia)

Por otro lado, el coste del software será de 4,5US\$ anuales por módulo instalado. Este coste se corresponde con pago por el uso de la licencia PAYG.

Teniendo en cuenta los criterios que se acaban de presentar y el total de módulos instalados, el coste total comercial sería el que se puede observar en la siguiente tabla:

Tiempo dedicado a cobrar/año (h)	1.500
Tiempo dedicado a atender llamadas por incidencias/año (h)	456,25
Coste funcionario por cobrar + atender llamadas (US\$)	8.803,13
Coste software	2.250
TOTAL COSTE COMERCIAL (US\$)	11.053,13

Tabla 28. Coste comercial total (Elaboración propia)

RECAMBIO BATERÍAS

El recambio de las baterías se llevará a cabo una vez transcurridos 10 años de la instalación de los quipos.

En este coste se tendrá en cuenta la mano de obra, el transporte y los materiales a reemplazar, en este caso las baterías. La tarea la llevarán a cabo los mismos trabajadores que para la instalación de los equipos, un oficial y un peón.

Todas las baterías serán reemplazadas, es decir, las de los 500 equipos instalados. Se trata de un coste que corre a cuenta de la empresa proveedora del servicio, al que los usuarios no deben hacer frente. El recambio incluye la caja entera de la batería, es decir, con el display, la caja protectora...

El coste del recambio de las baterías es el que se puede observar en las siguientes tablas:

Materiales (US\$)	
Coste unitario batería 25Ah	170
Coste unitario batería 50Ah	293,11

Tabla 29. Coste materiales recambio caja baterías (Elaboración propia)

Descripción coste	US\$	Coste unitario⁶⁶
Transporte por 1 día de reinstalaciones	63,06	10,51
Mano de Obra por 1 día de reinstalaciones	65,92	10,98

Tabla 30. Coste transporte y mano de obra recambio caja baterías (Elaboración propia)

Coste materiales baterías de 25Ah	68.000
Coste materiales baterías de 50Ah	29.311
Coste mano obra recambio baterías	5.493,3
Coste transporte por recambio baterías	5.255
Total Reposición por agotamiento vida útil baterías (US\$)	108.059,3

Tabla 31. Total coste recambio caja baterías (Elaboración propia)

ROTACIÓN POR IMPAGOS

Se ha considerado que al año habrá un 2% de usuarios que dejarán de pagar por sus equipos. Estos equipos serán reinstalados en otros hogares tras 6 meses. El traspaso de estos equipos tendrá asociado un coste de mano de obra, de transporte y de materiales, dado que quizás algún componente ha sido dañado o mal usado.

El coste de retiro y reinstalación se calculará en base a los siguientes valores:

Coste Recursos Retiro	
Mano de obra/día (oficial + peón) (US\$)	65,92
Transporte/día (US\$)	63,06
Coste Recursos Reinstalación	
Mano de obra/día (oficial + peón) (US\$)	65,92
Transporte/día (US\$)	63,06
Coste Adicional Material/kit (US\$)	10
Kits Retirados y reinstalados/día	1

⁶⁶ Se ha considerado un total de 6 baterías reemplazadas por día.

Tabla 32. Coste retiro y reinstalación (Elaboración propia)

Considerando los 500 equipos instalados, el coste total por retiro y reinstalación será el siguiente:

Equipos retirados y reinstalados anualmente	10
Coste Recursos Retiro+Reinstalación	2.579,6
Coste Material Adicional	100
Total Coste Retiro + Reinstalación	2.689,6

Tabla 33. Coste total retiro+reinstalación (Elaboración propia)

A modo de resumen, el total de los gastos anuales sería el siguiente (valores en US\$):

Fijos	24.900
Mantenimiento	16.678,5
Comerciales	11.053,13
Recambio baterías	108.059,3
Retiro+Reinstalación	2.689,6

Tabla 34. Resumen costes (Elaboración propia)

Dado que el recambio de las baterías es un coste que se da únicamente en el año 10, su coste normalizado se determinará de forma independiente al conjunto de los demás.

Por consiguiente, por un lado, se va a calcular el coste normalizado de todos los gastos anuales:

$$C_0 = 24.900 + 16.678,5 + 11.053,13 + 2.689,6 = 55.321,2 \text{ US\$}$$

La tasa nominal de incremento de los costes se ha fijado en un 1%. Por lo tanto:

$$C_N = C_0 * f_{kc} * fa$$

$$kc = \frac{1 + r}{1 + WACC} = \frac{1,01}{1,08} = 0,935$$

$$fkc = \frac{kc * (1 - kc^N)}{1 - kc} = 10,65$$

$$C_N = 55.321,2 * 10,65 * 0,1019 = 60.036,5 \text{ US\$}$$

Por otro lado, y dado que el recambio de las baterías es un gasto puntual, como la inversión, para determinar su coste normalizado a día de hoy se seguirán los siguientes pasos:

- proyectar ese coste en el año 10, gracias a la tasa nominal de incremento.
- calcular con el WACC el valor actual de esa proyección.
- anualizar el coste.

$$C_{Nrecamb} = 108.059,3 * \frac{(1 + 1\%)^{10}}{(1 + 8\%)^{10}} * 0,1019 = 5.631,3 \text{ US\$}$$

7.4. Ingresos Normalizados

Para poder normalizar los ingresos se ha determinado con una tasa nominal de proyección. Sin embargo, dado que se busca que los sistemas sean accesibles para usuarios con ingresos bajos, esta tasa nominal de proyección será mínima, y se ha fijado en un 0,1%.

Para normalizar los ingresos, se llevará a cabo el mismo procedimiento que con los gastos.

Los ingresos se han dividido en 4 partidas:

- **Tarifa** mensual pagada por el usuario.
- **Subsidio**.
- Descuentos anuales por **indisponibilidad de los equipos** por reparaciones.
- Pérdida de ingresos que es causada por **impagos** de los usuarios.

Se han establecido las siguientes cuotas mensuales:

CUOTAS MENSUALES	
Cuota mensual módulo 120Wp (US\$)	15,0
Cuota mensual módulo 240Wp (US\$)	20,0

Tabla 35. Cuotas mensuales (Elaboración propia)

Dado el subsidio del 70%, la tarifa pagada por los usuarios será de 4,5US\$ mensuales en el caso del módulo de 120Wp y 6US\$ mensuales en el caso del módulo de 240Wp.

La tasa de indisponibilidad de equipos se ha estimado con los valores que se presentan en la tabla:

INDISPONIBILIDAD EQUIPOS	
Tasa diaria de llamadas por incidencia (kit 120Wp)	1%
Tasa diaria de llamadas por incidencia (kit 240Wp)	1%
Tiempo medio de reparación (días)	1
Tarifa usuario equivalente a 1 día de servicio (kit 120Wp)	0,15
Tarifa usuario equivalente a 1 día de servicio (kit 240Wp)	0,20

Tabla 36. Tasa indisponibilidad de equipos (Elaboración propia)

Por último, se ha tenido en cuenta una tasa del 2% de impagos anual. Estos impagos se deben a que estos usuarios no están interesados en seguir con el SFA pero no lo comunican. Tras 6 meses consecutivos sin pagar, los equipos serán reinstalados en otros hogares.

La siguiente tabla muestra a modo de resumen el valor de los ingresos:

Ingresos por tarifas usuarios	28.800,0
Ingresos por subsidio	67.200,0
Indisponibilidad equipo	(292,0)
Impagos	(288,0)

Tabla 37. Ingresos anuales (Elaboración propia)

En total representa unos ingresos totales de **95.420 US\$**.

Su valor normalizado se calculará como:

$$ki = \frac{1 + 0,1\%}{1 + 8\%} = 0,927$$

$$fki = \frac{ki * (1 - ki^N)}{1 - ki} = 9,897$$

$$I_N = 95.420 * 9,897 * 0,1019 = 96.231,5 \text{ US\$}$$

7.5. Resultado y conclusión

Para que el proyecto sea rentable, debe cumplirse que la suma de la inversión y los costes normalizados sea inferior a los ingresos normalizados.

Con los valores calculados previamente se obtiene (valores en US\$):

Ingresos normalizados	96.231,5
Inversión normalizada	24.063
Costes normalizados	65.667,8

Tabla 38. Resumen ingresos y costes normalizados (Elaboración propia)

$$I_N = 96.231,5 \geq C_{Ntot} = 89.730,8$$

Dado que los ingresos normalizados son superiores al total de los costes, se puede afirmar que el proyecto es rentable.

Podría discutirse que la diferencia entre ambos es pequeña, sin embargo, el objetivo del presente estudio económico es demostrar que ofrecer el servicio eléctrico mediante SFA en la última milla es sostenible económicamente a largo plazo, hecho que queda demostrado con el cálculo. Además, la tasa de incremento de la tarifa eléctrica es 10 veces inferior a la de los costes. Se ha tomado esta decisión considerando que los usuarios de los sistemas pueden correr mayores riesgos de impago si la tarifa aumenta considerablemente con los años. Sin embargo, la diferencia entre los ingresos y los costes normalizados sería superior si esta tasa de aumento de la tarifa eléctrica aumentase, pero debería entonces considerarse aumentar el subsidio.

Conclusiones

Tras la realización del trabajo se puede concluir que dado el alto porcentaje de personas que carecen de acceso a la electricidad a nivel global, es necesario aumentar los esfuerzos dedicados a la búsqueda del mejor método que permita la electrificación de estas personas.

La mayoría de estas personas habitan en comunidades rurales aisladas donde la extensión de la red eléctrica (considerado el método de electrificación convencional) no es posible, por motivos técnicos u económicos. Esto hace que se requieran de sistemas fuera de red para su electrificación (MR o SFA).

El uso de sistemas fotovoltaicos autónomos es considerado en muchas ocasiones el mejor método para llevar la electricidad a estas personas. Sin embargo, para que proveer la energía mediante estos sistemas sea sostenible a largo plazo se requiere de una correcta planificación, y una elección adecuada del modelo de suministro.

Este modelo de suministro está dividido principalmente en tres partes: el modelo tecnológico, económico y de gestión.

En primer lugar, es importante determinar adecuadamente la tecnología que se empleará para ofrecer el servicio. Tras analizar la evolución de los sistemas fotovoltaicos, se recomienda el uso de sistemas de tercera generación que integren sistemas de prepago. Además, los paneles deberían ser de 120Wp o 240Wp, para poder ofrecer un servicio que se corresponda con el nivel 3 de la escala MTF.

Por otro lado, el modelo económico a emplear debería ser el de “Energía como Servicio”. Este modelo facilita la asequibilidad de los sistemas para sus usuarios, quienes poseen bajos ingresos económicos. Garantizan la sostenibilidad del suministro, y que el servicio sea escalable en la medida que puedan hacer frente al pago.

Por último, el modelo de gestión debe incluir la participación de distintos actores. Entre ellos destacan los CAU, desde donde se podrán realizar los pagos por los equipos y se podrán atender llamadas relacionadas con el mantenimiento de los mismos. Destacan también los CEF, que permitirán la participación activa de las comunidades en todo el proceso de electrificación.

En cuanto a la rentabilidad del proyecto desde el punto de vista del proveedor eléctrico, ha quedado demostrado que ofrecer el servicio a 500 usuarios es rentable. Aumentar el número de usuarios aumentaría también la rentabilidad del proyecto.

Por último, recordar la necesidad de analizar continuamente los resultados reales de casos concretos de implementación para ir adaptando y mejorando el proceso.

Referencias

ACCIONA. (2017). *Acciona Microenergía México*. https://safundacionmicro.blob.core.windows.net/media/2589/201701_itdupm-bid-casos-oaxaca-es.pdf

ACCIONA. (2023). *Luz en Casa. Programa para proveer servicio eléctrico a hogares en comunidades rurales*. https://www.accion.org/es/peru/luz-en-casa/?_adin=02021864894

ACNUR. (2021). *Tendencias Globales Desplazamiento forzado en 2021*. <https://www.acnur.org/stats/globaltrends/62aa717288e/tendencias-globales-de-acnur-2021.html>

ACNUR. (2022). *Las cifras de desplazamiento forzado en el mundo alcanzan un nuevo máximo y confirman una década de incrementos*. <https://www.acnur.org/noticias/press/2022/6/62aa42164/acnur-las-cifras-de-desplazamiento-forzado-en-el-mundo-alcanzan-un-nuevo.html>

ADB. (2010). *Asian Development Bank's Assistance for Rural Electrification in Bhutan – Does electrification improve quality of rural life?*. https://www.adb.org/sites/default/files/evaluation-document/35046/files/in212-10_6.pdf

Alber Callejo. (2023). *La capacidad de producción de las baterías de sodio podría crecer más rápido de lo pronosticado por los analistas*. <https://forococheselectricos.com/2023/07/capacidad-produccion-baterias-sodio-crecer-mas-rapido-de-lo-esperado.html>

Amol Phadke, Arne Jacobson, Won Young Park, Ga Rick Lee, Peter Alstone, Amit Khare. (2015). *Powering a Home with Just 25 Watts of Solar PV: Super-Efficient Appliances Can Enable Expanded Off-Grid Energy Service Using Small Solar Power Systems*. <https://escholarship.org/content/qt3vv7m0x7/qt3vv7m0x7.pdf?t=p0fuga>

Andrea A. Eras-Almeida, Migl Fernández, Julio Eisman, José G. Martín, Estefania Caamaño, Miguel A. Egado-Aguilera. (2019). *Lessons Learned from Rural Electrification Experiences with Third Generation Solar Home Systems in Latin America: Case Studies in Peru, Mexico, and Bolivia*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/24/7139>

Andreas Sahlberg, Alexandros Korkovelos, Babak Khavari, Oluchi Monwe, Dimitrios Mnetis, Christopher Arderne. (2020). *OnSSET*. <https://onsset.readthedocs.io/en/latest/index.html>

Anil Cabraal, William A. Ward, V. Susan Bogach, Amit Jain (2021). *Living in the light: the Bangladesh solar home system story*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/153291616567928411/pdf/Living-in-the-Light-The-Bangladesh-Solar-Home-Systems-Story.pdf>

Anton Eberhard, Catrina Godinho. (2017). *A review and exploration of the status, context and political economy of power sector reforms in Sub-Saharan Africa, South Asia and Latin America*. https://www.gsb.uct.ac.za/files/Eberhard_and_Godinho_2017.pdf

Alliance for Rural Electrification (ARE), Interamerican Development Bank (IDB). (2021). *Status of the off-grid renewable energy market in Latin America & the Caribbean*. <https://www.ruralelec.org/sites/default/files/Status%20of%20the%20off-grid%20renewable%20energy%20market%20in%20Latin%20America%20%26%20the%20Caribbean%202021.pdf>

AutoSolar. (s.f.a). *La curva de intensidad-voltaje y la de potencia-voltaje de un panel solar. El papel del regulador de carga*. <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/la-curva-de-intensidad-voltaje-y-la-de-potencia-voltaje-de-un-panel-solar-el-papel-del-regulador-de-carga>

AutoSolar. (s.f.b). *¿Qué es un regulador de carga?*. <https://autosolar.es/aspectostecnicos/que-es-un-regulador-de-carga>

Barnes, D., & Halpern, J. (2001). Reaching the poor. *Refocus*, 2(6), 32-37. https://www.researchgate.net/publication/222762655_Reaching_the_poor

Banal-Estañol, A., Calzada, J., y Jordana, J. (2017). How to achieve full electrification: Lessons from Latin America. *Energy Policy*, 108, 55-69. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421517303208>

BIRTH. (s.f.). ISF06 – *Diseño, dimensionado y selección de componentes de instalaciones fotovoltaicas autónomas*. https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF06/es_IEA_ISF06_Contentos/website_in dex.html

Blechinger P., Hoehler M., Juette C., Berendes S. (2019). *Off-grid Renewable Energy for Climate Action – Pathways for change*. https://www.researchgate.net/publication/342260800_Off-Grid_Renewable_Energy_for_Climate_Action_-_Pathways_for_change

Cambio Energético. (2021). *Células solares de perovskita: ¿una apuesta de futuro para el autoconsumo fotovoltaico?*. <https://www.cambioenergetico.com/blog/celulas-solares-perovskita/>

Cambio Energético. (2022). *Profundidad de descarga (DOD): ¿Qué significa para tu batería y por qué es importante?*. <https://www.cambioenergetico.com/blog/profundidad-descarga-bateria/>

Clever solar devices. (2020). *Por qué son importantes las curvas IV*. <https://www.cleversd.com/es/blog/que-son-tan-importantes-curvas-iv>

Columbia University. (2017). *Network Planner*. <https://qsel.columbia.edu/network-planner/>

Diario Motor. (2023). *Qué son los electrolitos sólidos y por qué solucionarán para siempre los problemas de batería de los coches eléctricos.* <https://www.diariomotor.com/que-es/electrolito-solido/>

Diego Gutiérrez. (2023). *Las baterías de sodio, más baratas y seguras, dan el paso definitivo para su adopción masiva.* https://www.hibridosyelectricos.com/coches/baterias-sodio-mas-baratas-seguras-dan-paso-definitivo-su-adopcion-masiva_69095_102.html

Dirección Nacional de Electrificación Rural, DGER. (2020). *Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER). Periodo 2021-2023.* <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1987203/PLAN%20NACIONAL%20DE%20ELECTRIFICACION%20RURAL%202021%20-%202023.pdf.pdf>

Douglas Ellman. (2009). *The Reference Electrification Model: A computer model for planning rural electricity access.* <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/98551/920674644-MIT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Echeverri, J. C. (2021). *Accesibilidad a la electricidad en la región: inversión y retos.* <https://forbescentroamerica.com/2021/10/15/accesibilidad-a-electricidad-en-la-region-inversion-y-retos>

Economist Impact. (2022). *The Inclusive Internet Index 2022.* <https://impact.economist.com/projects/inclusive-internet-index/downloads/3i-executive-summary.pdf>

Efficiency for Access. (2020). *Solar Milling: exploring market requirements to close the commercial viability gap.* https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/SolarMilling_Market-Requirements.pdf

Efficiency for Access. (2021). *Uses & Impacts of Solar Water Pumps.* <https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/Use-and-Impacts-of-SWPs-July-2021-v2.pdf>

Efficiency for Access. (2023a). *Agriculture & Energy Efficiency.* <https://efficiencyforaccess.org/themes/agriculture-energy-efficiency>

Efficiency for Access. (2023b). *Assessment of the cold chain market in Kenya.* <https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/Assessment-of-the-Cold-Chain-Market-in-Kenya.pdf>

Efficiency For Access Coalition. (2021a). *Televisions Solar Appliance Technology Brief.* https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/EforA_Solar-Appliance-Technology-Brief_Televisions_May-2021.pdf

Efficiency For Access Coalition. (2021b). *2021 Appliance Data Trends. Insights on Energy Efficiency, Performance and Pricing for Off-Grid and Weak-Grid Appropriate*

Appliances. <https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/2021-ApplianceDataTrends.pdf>

Efficiency For Access Coalition. (2021c). *ICT Solar Appliance Technology Brief.* https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/EforA_Solar-Appliance-Technology-Brief_ICT_August-2021.pdf

Efficiency For Access Coalition. (2021d). *Fans Solar Appliance Technology Brief.* https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/EforA_Solar-Appliance-Technology-Brief_Fans_May-2021.pdf

Efficiency For Access Coalition. (2021e). *Refrigerators Solar Appliance Technology Brief.* https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/Solar_Appliance_Tech_Brief_Refrigerators_June2021_2021-08-06-151639_yvad.pdf

Efficiency For Access Coalition. (2021f). *Permanent Magnet Motors Solar Appliance Technology Brief.* https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/2021-Solar-Appliance-Technology-Brief-Permanent-Magnet-Motors_2021-08-10-125236_gllo.pdf

Efficiency For Access Coalition. (2021g). *The Benefits of Permanent Magnet Motors. Efficiency opportunities in off- and weak-grid appliance markets.* https://storage.googleapis.com/e4a-website-assets/The-Benefits-of-Permanent-Magnet-Motors_Efficiency-for-Access.pdf

Energética. (2011). *Curva I-V.* <http://www.energetika.com.ar/Curva%20I-V.html>

ENERGIA. (2019). *Gender in transition to sustainable energy for all: From evidence to inclusive policies.* https://www.energia.org/assets/2019/04/Gender-in-the-transition-to-sustainable-energy-for-all_-From-evidence-to-inclusive-policies_FINAL.pdf

ESMAP, Energy Sector Management Assistance Program (2015). *“Beyond Connections - Energy Access Redefined.* <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/24368/Beyond0connect0d000technical0report.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ESMAP. (2020). *Off-Grid Solar Market Trends Report 2020.* <https://www.esmap.org/off-grid-solar-market-trends-report-2020>

ESRI (Environmental Systems Research Institute). (2023). *What is GIS?.* <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>

Facebook. (2018). *Powering last-mile connectivity.* <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2018/02/Powering-Last-Mile-Connectivity-BNEF-and-Facebook.pdf>

Francis Kemausuor, Edwin Adkins, Isaac Adu-Poku, Abeeku Brew-Hammond, Vijay Modi. (2014). *Electrification planning using Network Planner tool: The case of Ghana*.

<https://qsel.columbia.edu/assets/uploads/blog/2013/09/EnergyForSustainableDevelopment-ElectrificationPlanningInGhana-KemausuorEtAl.pdf>

Global Electrification Platform, GEP. (2023). <https://electrifynow.energydata.info/>

GOGLA. (2018). *Powering Opportunity: The Economic Impact of Off-Grid Solar*. https://www.gogla.org/sites/default/files/resource_docs/gogla_powering_opportunity_report.pdf

GOGLA. (2022). *Global Off-Grid Solar Market Report Semi-Annual Sales and Impact Data*. https://www.gogla.org/wp-content/uploads/2023/05/gogla_sales-and-impact-report-h2-2022.pdf

HUB de Energía ALC. (2018). *Brecha de inversión para acceso universal de electricidad al 2030*. <https://hubenergia.org/es/indicadores/brecha-de-inversion-para-el-acceso-universal-de-electricidad-al-2030>

IEA. (2020). *Defining energy access: 2020 methodology*. <https://www.iea.org/articles/defining-energy-access-2020-methodology>

IEA, IRENA, United Nations Statistics Division, The World Bank, World Health Organization. (2023). *Tracking SDG7. The energy progress report 2023*. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/Tracking_SDG7_energy_progress_2023.pdf?rev=f937758f92a74ab7ac48ff5e8842780a

International Finance Corporation (IFC). (2012). *From Gap to Opportunity: Business Models for Scaling Up Energy Access*. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/publications_report_gap-opportunity

Intesur, Integraciones Energéticas del Sur S.L. (2020). *Baterías de gel: ¿Qué son y cómo funcionan?*. <https://intesur.com/baterias-gel-como-funcionan/>

IRENA, International Renewable Energy Agency (2022). *Off-Grid Renewable Energy Statistics 2022*. https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Dec/IRENA_Off-grid_Renewable_Energy_Statistics_2022.pdf

Jimenez, R. (2017). *Development Effects of Rural Electrification*. <https://publications.iadb.org/publications/english/viewer/Development-Effects-of-Rural-Electrification.pdf>

Jeff Stottlemeyer. (2018). *What we mean by “productive use”-and why it matters*. <https://www.powerforall.org/insights/technologies/what-we-mean-productive-use-and-why-it-matters>

Krithika P.R., Debajit Palit. (2013). *Participatory Business Models for Off-Grid Electrification*. https://www.researchgate.net/publication/261946063_Participatory_Business_Models_for_Off-Grid_Electrification

Lambrou Y., Piana G. (2006). *Energy and gender in rural sustainable development*. <https://www.fao.org/3/ai021e/ai021e00.pdf>

LED42. (2022). *Equivalencia Varios LED*. <https://led42.es/blog/iluminacion-led-consejos-y-aplicaciones/-bombillas-e14-e27-equivalencia-led-vs-incandescentes>

Lighting Global. (2019). *The Market Opportunity for Productive Use Leveraging Solar Energy (PULSE) in Sub-Saharan Africa*. <https://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2022/04/PULSE-Report.pdf>

Lighting Global. (2022). *Off-Grid Solar Market Trends Report 2022: State of the sector*. https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/Off-Grid%20Solar%20Market%20Trends%20Report%202022_Full_Optimized.pdf

Lighting Africa, World Bank Group, Schatz Energy Research Center, ECREEE. (2023). *Requirements and Guidelines for installation of off-grid solar systems for public facilities*. <https://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2021/05/QualityAssurance-OffGridSolar-PublicFacilities-Nov2020.pdf>

Loreta Nakuçi, Aida Spahiu. (2018). *Saving Energy by Replacing IM with BLDC Motor in Fan Application*. https://www.researchgate.net/publication/327532713_Saving_Energy_by_Replacing_IM_with_BLDC_Motor_in_Fan_Application

Lovesharing. (2023). *Todo sobre las baterías de ion litio*. <https://www.lovesharing.com/baterias-de-litio-recargables/#:~:text=A1%20contrario%20que%20las%20bater%C3%ADas,el%201%2D2%25%20mensual>

Mark Z. Jacobson, Vijaysinh Jadhav. (2018). *World Estimates of PV Optimal Tilt Angles and Ratios of Sunlight Incident Upon Tilted and Tracked PV Panels Relative to Horizontal Panels*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X1830375X>

Mary Robinson Foundation Climate Justice (MRF CJ). (2012). *Enabling women’s development and empowerment through access to clean, affordable, sustainable energy*. https://www.mrfcj.org/pdf/Enabling_womens_development_and_empowerment_thru_access_to_clean_affordable_sustainable_energy.pdf

MAUE. (2015). *Nivel Adecuado de Acceso Universal a la Energía*. <https://accesouniversalalaenergia.files.wordpress.com/2020/02/reflexic3b3n-sobre-el-nivel-adecuado-de-acceso-a-la-energ3ada-1.pdf>

Mendoza Méndez F.M. (2015). *El papel de los recursos energéticos distribuidos y las redes inteligentes*. http://www.oas.org/es/sedi/dsd/Energia/ECPA/01_RecursosEnergeticos_y_RD_FMendoza.pdf

MGP, Mini-grids Partnership (2020). *State of the Global Mini-grids Market Report 2020*. https://minigrids.org/wp-content/uploads/2020/06/Mini-grids_Market_Report-20.pdf

Miguel Hernán Fernández Fuentes. (2017). *Innovaciones Tecnológicas para Mejorar el Acceso Universal - Los SFV 3G*. <http://www.energetica.org.bo/energetica/publicacionesd.asp?d=339>

Miguel Hernán Fernández Fuentes. (2021). *Modelo Institucional para la Difusión de Sistemas Fotovoltaicos de Tercera Generación en Bolivia*. https://oa.upm.es/70105/1/MIGUEL_HERNAN_FERNANDEZ_FUENTES.pdf

Mikul Bhatia, Nicolina Angelou. (2015). *Beyond Connections, Energy Access Redefined*. https://mtfenergyaccess.esmap.org/data/files/download-documents/full_report_beyond_connection.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el reto Demográfico. (2013). *¿Lámparas de LEDs o fluorescentes compactas?*. <https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/carpeta-informativa-del-ceneam/novedades/lamparas-led-versus-compactas.aspx>

Narayan N.S. (2019). *Solar home systems for improving electricity access*. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aaa29b04f-4cd7-41fa-b48b-5edc75fef104>

NotiAgro. (2013). *Las cercas eléctricas, una opción para mejorar la productividad de la industria pecuaria*. <https://www.agromundo.co/blog/las-cercas-electricas-una-opcion-para-mejorar-la-productividad-de-la-industria-pecuaria>
<https://www.agromundo.co/blog/las-cercas-electricas-una-opcion-para-mejorar-la-productividad-de-la-industria-pecuaria/>

OLADE, Organización Latinoamericana de energía; sieLAC, Sistema de Información Energética de Latinoamérica y el Caribe; BID (2021). *Panorama Energético de América Latina y el Caribe*. <https://www.olade.org/publicaciones/panorama-energetico-de-america-latina-y-el-caribe-2021/>

ONU. (2022a). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022_Spanish.pdf

Ortiz R., Pérez-Arriaga I., Dueñas P., González A., Mejía M., Révolo M. (2020). *Misión de Transformación Energética y Modernización de la Industria Eléctrica: Hoja de Ruta para la Energía del Futuro. Foco No 4. Cierre de brechas, mejora de la calidad y diseño y formulación eficiente de subsidios.* https://www.minenergia.gov.co/documents/7686/Foco_4._Cierre_de_brechas_mejora_de_la_calidad_y_dise%C3%B1o_y_formulacion_eficient_JTF0ADK.pdf

Pablo Muñoz. (2020). *Electrificación Distribuida: Sistemas Híbridos y Minigrids.* https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/5_jornada_zni_studer.pdf

Pedro Ciller, Douglas Ellman, Claudio Vergara, Andrés González-García, Stephen J. Lee. (2019). *Optimal Electrification Planning Incorporating On- and Off-Grid Technologies: The Reference Electrification Model (REM).* <https://ieeexplore.ieee.org/document/8760510>

Pérez-Arriaga I., Díaz-Pastor S., Mastropietro P., de Abajo C (2022). *The Electricity Access Index Methodology and Preliminary Findings.* https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/73475/2021-05-05_The_Electricity_Access%2bIndex_Methodology_and_Preliminary_Findings_v1_1-REVIEW.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

PowerTech systems. (2022). <https://qksol.com/powertech/>

Pueyo, A. G. (2013). *The Evidence of Benefits for Poor People of Increased Renewable Electricity Capacity.* <https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/bitstream/handle/20.500.12413/2961/ER31%20Final%20Online.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

RAI, Real Academia de Ingeniería, Pérez Arriaga J.I., Moreno Romero A. (2011). *Tecnologías para el desarrollo humano de las comunidades rurales aisladas.* <https://www.raing.es/pdf/publicaciones/libros/tecnologias-para-el-desarrollo-humano/CAP%C3%8DTULO%20%20-%20CRA.pdf>

República de Panamá. (2011). *LEY 43.* https://www.asamblea.gob.pa/APPS/LEGISPAN/PDF_NORMAS/2010/2011/2011_582_1118.pdf

República de Panamá, BID, Transición Energética Panamá (2022). *Estrategia Nacional de Acceso Universal a la Energía.* <https://www.fundacionmicrofinanzasbbva.org/revistaprogreso/estrategia-nacional-de-acceso-universal-a-la-energia/>

Richard Hansen. (2016). *Energía Sostenible para Todos. ExpoEnergía 2016.* <http://www.expoenergiahn.com/expoenergiahn.com/descargas/conferencias/Energ%C3%ADa%20Sostenible%20para%20Todos.pdf>

Rojas A., Schmitt F., Aguilar L. (2011). *Guidelines on Renewable Energy Technologies for Women in Rural and Informal Urban Areas.*

https://www.energia.org/assets/2016/09/Guidelines_on_Renewable_Energy_Technologies_for_Women_in_Rural_and_Informal_Urban_Areas.pdf

Ruth Varela, Angel Verástegui. (2016). *Impulsando el mercado de sistemas Pico Fotovoltaicos en Perú*. https://energypedia.info/images/b/b3/Impulsando_el_mercado_de_sistemas_Pico_PV_en_Per%C3%BA.pdf

Rutty Paola Ortiz Jara. (2019). *Recomendación para a reforma institucional del sector eléctrico para las zonas no interconectadas – ZNI*. <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/view/7480>

Salvador Orts Grau, Francisco Gimeno, Salvador Seguí Chilet, Pablo González Altozano, Ibán Balbastre Peralta, Carmen Virginia Palau Estevan, María Gasque Albalate, Alejandro Escribá Aparisi. (2020). *Instalación Fotovoltaica con Almacenamiento en Baterías de Litio para la Inclusión de los Objetivos de Desarrollo sostenibles en las Ingenierías*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7980473>

Sanin, M. (2019). *Zooming into successful energy policies in Latin America and the Caribbean: reasons for hope*. Washington: Interamerican Development Bank. Obtenido de: https://publications.iadb.org/publications/english/document/Zooming_into_Successful_Energy_Policies_in_Latin_America_and_the_Caribbean_Reasons_for_Hope_en.pdf

Secretaría General Iberoamericana SEGIB, Asociación Iberoamericana de entidades reguladoras de la energía ARIAE, Mesa de Acceso Universal a la Energía MAUE. (2021). *Alcanzar la última milla - Energía asequible, segura, sostenible y moderna para todas las personas*. <https://www.segib.org/wp-content/uploads/ODS7-Iberoamerica-2021.pdf>

SE4ALL, Sustainable Energy for all (2022). *Nigeria Integrated Energy Plan*. The Reckefeller Foundation, Global Energy Alliance for People and Planet. https://www.seforall.org/system/files/2022-01/Nigeria_IEPT-Executive_Summary.pdf

Smart Villages. (2015). *Smart villages: the gender and energy context*. <https://e4sv.org/wp-content/uploads/2015/08/03-Technical-Report.pdf>

Smart Villages. (2017). *Off-grid energy for rural development in Latin America and the Caribbean closing workshop*. https://e4sv.org/wp-content/uploads/2017/05/WR36-Off-grid-energy-for-rural-development-in-Latin-America-and-the-Caribbean-closing-workshop_web.pdf

Solarfam. (2020). *Tecnologías y tipologías de paneles fotovoltaicos*. <https://solarfam.com/tecnologias-y-tipologias-de-paneles-fotovoltaicos/>
SOLUZ. (2023). <https://www.soluzhonduras.com/quienes-somos>

Supremo Tribunal Federal Brasil. (2020). *Constitución de la República Federativa de Brasil*. https://www.stf.jus.br/arquivo/cms/legislacaoConstituicao/anexo/CF_espanhol_web.pdf

United Nations. (2014). *Improving quantification of women's unpaid work in support of poverty eradication policies*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39576/S2014139_en.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Uteng T. (2011). *Gender and mobility in the developing world*. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/a9b17dbd-1764-569c-b8c5-f8fb8522d5d3/content>

VeraSol. (2020). *Summary of Requirements in IEC TS 62257-9-8:2020*. <https://storage.googleapis.com/verasol-assets/Summary-of-IEC-62257-9-8.pdf>

VeraSol. (2022). *System Design Guidelines. Includes Solar-only PV Systems and Hybrid Systems Comprising PV and Fuel Generators*. https://storage.googleapis.com/verasol-assets/Design-Guidelines_Component-based-Off-Grid-Solar-Energy-Systems_June-2022.pdf

VeraSol. (2023a). *Quality Standards*. <https://verasol.org/solutions/quality-standards>

VeraSol (2023b). *Test Methods*. <https://verasol.org/solutions/test-methods>

World Bank, ICT, GOGLA. (2018). *Taxonomy for Off-Grid Energy Companies*. https://www.gogla.org/sites/default/files/resource_docs/wbg_taxonomy_011818_yp_v1_4interactive.pdf

World Bank Group. (2023). *Global Solar Atlas*. <https://globalsolaratlas.info/download/world>

Yuzuru Kushiya, Masashi Matsuoka. (2019). *Time Series GIS Map Dataset of Demolished Buildings in Mashiki Town after the 2016 Kumamoto, Japan Earthquake*. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/19/2190>

Anexo I. Relación con Objetivos de Desarrollo Sostenible

En 2015, la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en donde se establece un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad. En concreto, el Objetivo de Desarrollo No.7, recoge la cuestión energética promoviendo garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Para alcanzar este objetivo se proponen cinco metas (de aquí a 2030) relacionadas entre sí (ONU, 2022b):

- 7.1. Garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
- 7.2. Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.
- 7.3. Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- 7.a. Aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles.
- 7.b. Ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en países en desarrollo.

El acceso universal a la energía debe conseguirse teniendo en cuenta todas y cada una de las metas, debido a que de hacerse de otro modo se corre el riesgo de que se dificulte la consecución de otros objetivos de desarrollo sostenible.



Ilustración AI- 1. La energía asequible y limpia apoya todos los ODS (IRENA, 2017)

El trabajo desarrollado está estrechamente relacionado con muchos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Concretamente, la producción y el consumo de energías tienen una importante contribución en el cambio climático (ODS 13). Las energías renovables ofrecen, por ejemplo, una oportunidad al mundo de mantener el aumento de la energía a nivel global por debajo de 2°C. Además, juegan un papel clave en la transición hacia una energía urbana sostenible (ODS 11) y pueden evitar los efectos negativos que la producción y el consumo de energía tienen sobre los ecosistemas y la biodiversidad (ODS

15). Por otro lado, contribuyen al desarrollo y bienestar humanos. Permiten reducir enfermedades atribuidas a la contaminación del aire en interiores producida por cocinar con biomasa tradicional y cocinas poco eficientes, mejoran los servicios de salud y reducen el tiempo que mujeres y niñas dedican a recoger leña (ODS 3, ODS 4 y 5) (IRENA, 2017).

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible se establecieron a partir del imperativo moral de “no dejar a nadie atrás”. Esta promesa no implica solo llegar a los más pobres, sino que también requiere combatir la discriminación y las desigualdades dentro y entre los países. Se pretende hacer frente a retos con los que se encuentran muchos países en desarrollo actualmente como son récords de inflación, aumento de las tasas de interés y de las cargas de deuda o bajas tasas de vacunación de Covid-19 (ONU, 2022a).

Referencias

IRENA, International Renewable Energy Agency (2017). *Repensando la Energía*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Jan/IRENA_REthinking_2017_Summary_ESP.PDF?la=en&hash=8D28A5D7C7F8BA3234FA1384A96976807EFE1CD6

ONU. (2022a). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022_Spanish.pdf

ONU. (2022b). *Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

Anexo II. Catálogo de equipos en hoja Excel

CÁLCULO CONSUMO DIARIO

La presente hoja de cálculo le permite dimensionar un conjunto de equipos consumidores que permitan dar acceso a la electricidad a un hogar. Podrá elegir para cada equipo, el modelo que requiera dentro de un catálogo que muestra las características más relevantes de cada uno de ellos. Además, podrá seleccionar las horas de uso de cada equipo. La hoja excel le devolverá el consumo horario y total derivado de su elección. Para el consumo diario se han considerado los consumos de las 6-20h.

Consideraciones: se le preguntará si desea introducir en el cálculo cada uno de los equipos, deberá seleccionar una de las dos opciones dadas, SÍ o NO. **ES NECESARIO MARCAR UNA DE LAS DOS OPCIONES PARA QUE LOS CÁLCULOS SE REALICEN CORRECTAMENTE**

ILUMINACIÓN			
¿Desea introducir iluminación?	<input type="checkbox"/> SÍ	En caso afirmativo, presione el botón para acceder al catálogo de iluminación	<input type="button" value="Catálogo Iluminación"/>
FRIGORÍFICO			
¿Desea introducir frigorífico?	<input type="checkbox"/> SÍ	En caso afirmativo, presione el botón para acceder al catálogo de frigoríficos	<input type="button" value="Catálogo frigoríficos"/>
TV			
¿Desea introducir televisión?	<input type="checkbox"/> SÍ	En caso afirmativo, presione el botón para acceder al catálogo de Televisiones	<input type="button" value="Catálogo Televisiones"/>
VENTILADOR			
¿Desea introducir ventilador?	<input type="checkbox"/> SÍ	En caso afirmativo, presione el botón para acceder al catálogo de ventiladores	<input type="button" value="Catálogo Ventiladores"/>
CARGADOR TELÉFONO MÓVIL			
¿Desea introducir un cargador para teléfono móvil?	<input type="checkbox"/> SÍ	En caso afirmativo, seleccione el número de teléfonos a cargar en un día	<input type="text" value="2"/>

A continuación, pulse el botón para seleccionar las horas de uso de los equipos. Consideraciones: se supone que el frigorífico está en funcionamiento durante las 24h del día, por lo que no se puede realizar cambios en su tiempo de uso. Respecto al cargador del teléfono, se supone que las cargas se realizarán durante la noche, dado que es la circunstancia más desfavorable para la carga de la batería. Además, se ha considerado una media de 10Wh requeridos para cargar el teléfono, que se repartirán durante 2 horas.

<input type="button" value="Seleccionar horas de funcionamiento de los equipos"/>			
Finalmente, para poder acceder a los resultados, pulse el siguiente botón			
<input type="button" value="Ver Resultados"/>			

Ilustración AII- 1. Estructura hoja Excel (Elaboración propia)

ILUMINACIÓN									
Marca -Modelo	Consumo (W)	Tipo producto	Temp. color (K)	Fuente Alimentación	Tensión Nominal (V)	Lúmenes	Lúmenes/W	Longitud cable (m)	Peso (kg)
Fosera LAMP mini 100	0,69	Multi-posición	5000	DC	12,8	100	145	6	0,15
Fosera Ceiling Lamp 100	0,78	Techo	5000	DC	12,8	110	141	6	0,31
Zimpertec BLp-12/01CW	1	Bombilla Bulbo	5700	DC	12	125	125	-	-
Fosera Ceiling Lamp 200	1,56	Techo	5000	DC	12,8	220	141	6	0,31
Phocos - SFL8502	2	Multi-posición	6400	DC	12,5	200	100	-	-
Zimpertec BLp-12/02CW	2	Bombilla Bulbo	5700	DC	12	250	125	-	-
Phocos - SFL8503	3	Multi-posición	6400	DC	12,5	300	100	-	-
Zimpertec BLp-12/03CW	3	Bombilla Bulbo	5700	DC	12	360	120	-	-
Fosera Ceiling Lamp 400	3,12	Techo	5000	DC	12,8	420	134	6	0,31
Fosera Tube Light 400	3,12	Tubo	5000	DC	12,8	400	128	6	0,35
Phocos - SFL8505	5	Multi-posición	6400	DC	12,5	500	100	-	-
Zimpertec BLp-12/05CW	5	Bombilla Bulbo	5700	DC	12	600	120	-	-
Fosera Tube Light 700	5,76	Tubo	5000	DC	12,8	700	121	6	0,35
Zimpertec BLp-12/07CW	7	Bombilla Bulbo	5700	DC	12	770	110	-	-

Tabla AII- 1. Catálogo de iluminación (Elaboración propia)

REFRIGERADOR-CONGELADOR					
Marca -Modelo	Consumo diario (Wh)	Consumo horario (Wh)	Tipo producto	Capacidad total (L)	Fuente Alimentación
Phocos FR100-B	174	7,25	Refrigerador	104	DC
Phocos FR230-B	193	8,042	Refrigerador	238	DC
Phocos FR350-B	228	9,5	Refrigerador	358	DC
Phocos FR100-B	561	23,375	Congelador	104	DC
Phocos FR230-B	899	37,46	Congelador	238	DC
Phocos FR350-B	981	40,875	Congelador	358	DC
Fridge Star LC86	154	6,42	Refrigerador	86	DC
Youmma NILO 100	182	7,6	Refrigerador	96	DC
Palfridge LC86	199	8,3	Refrigerador SDD	85	DC
Devidayal DDSF-100	329	13,7	Refrigerador	86	DC
Hangzhou HN67DC	526	21,92	Refrigerador-Congelador	-	DC
SureChill GVR75 Lite	538	22,42	Refrigerador	75	DC
Sunlight Solar BD-108	553	23,04	Refrigerador	93	DC

Tabla AII- 2. Catálogo de refrigeradores Parte I (Elaboración propia)

REFRIGERADOR-CONGELADOR					
Tensión Nominal (V)	Dimensiones (cm)	Peso (kg)	Precio (USD)	Tipo Refrigerante	Autonomía (h)
12	50,5*64*37,5	29	N/A	R600a ecológico	N/A
12	85,6*62,8*49,8	80	N/A	R600a ecológico	N/A
12	129*61,9*49,8	110	N/A	R600a ecológico	N/A
12	50,5*64*37,6	29	N/A	R600a ecológico	N/A
12	85,6*62,8*49,9	80	N/A	R600a ecológico	N/A
12	129*61,9*49,9	100	N/A	R600a ecológico	N/A
12	86*80*62	32	N/A	R600a	1,22
12	52*47*84,5	23	N/A	R600a	1,38
12	64*80,5*86,5	48	N/A	R600a	12,64
12	60,5*54*83,5	30	N/A	R134a	1,49
12-24	47*39*82	21	N/A	R134a	1
-	147*60*64	100	N/A	R290	N/A
12-24	58*52*85	30	242	R134a	0,62

Tabla AII- 3. Catálogo de refrigeradores Parte 2 (Elaboración propia)

TELEVISIÓN				
Marca -Modelo	Consumo en funcionamiento (W)	Pulgadas	Luminancia (CD/m2)	Fuente Alimentación
Zimpertec TV-DVB-T2/S2-19"	10	19	120	DC
Frontier Markets DVB-M11567HATS(CV3663BL-U)	11,1	15,5	144	DC
Sola 19,5"LED TV	12	19,4	96	DC
Ceanic Solar 15"	12,3	14,9	274	DC
NEW BUSH 16K5	12,5	15	156	DC
Zimpertec TV-DVB-T2/S2-24"	12,5	24	120	DC
LLOYD L19ND	12,7	18,6	274	DC
Aborder AB1525	13	15,3	221	DC
Omnivoltaic TV19/SPM-19	13,5	18,5	66	DC
Zimpertec TV-DVB-T2/S2-32"	13,5	32	110	DC
Pro Solar 15"	13,6	14,9	223	DC
Orex LED-17	14,1	17,1	157	DC
Frontier Markets DVB-M1185015HATS(CV3663BL-U)	15,3	18,5	221	DC
BESTON 18"LED	15,4	17,1	151	DC
Sola-SO19M	15,5	18,5	143	DC
SUPER STAR SS18.5 LED	15,8	18,5	183	DC
Soyi SYS3-19 LED TV	15,9	17	120	DC
MAKS 19M1A	16	18,5	245	DC
Fosera TV320	16	32	-	DC
Flamingo H3	16,5	15	195	DC
Panwoods LE1911	17,8	17,1	157	DC
Barefoot Power 180-30-0007-1	19,1	15,6	88	DC
Sola 19NA	19,6	18,5	297	DC

Tabla AII- 4. Catálogo Televisión Parte 1 (Elaboración propia)

TELEVISIÓN				
Tensión Nominal (V)	Dimensiones pantalla (cm2)	Tecnología de retroiluminación	Precio (USD)	Consumo (W) por cm2
12	-	LED	-	-
12	667	LED	161	0,0166
-	1024	LED	N/A	0,0117
12	688	LED	N/A	0,0179
12	702	LED	68	0,0179
12	-	LED	-	-
12	944	LED	121	0,0134
12	682	LED	68	0,0191
12	943	LED	237	0,0143
12	-	LED	-	-
12	690	CCFL	69	0,0197
12	916	LED	110	0,0154
12	943	LED	180	0,025
12	919	LED	76	0,0168
12	943	LED	N/A	0,0164
24	943	LED	N/A	0,0167
12	907	LED	88	0,0176
-	943	LED	N/A	0,0169
12	-	LED	-	-
12	697	LED	N/A	0,0237
12	920	LED	84	0,0194
12	673	LED	N/A	0,0284
12	943	LED	N/A	0,0208

Tabla AII- 5. Catálogo Televisión Parte 2 (Elaboración propia)

VENTILADOR				
Marca -Modelo	Consumo (W)	Tipo producto	Diámetro (mm)	Fuente Alimentación
Metropolitan MEB-10FD	5	Mesa	245	DC
NIWA ECO Air 9	6	Mesa	210	DC
SUNKING SK-720	8	Mesa	400	DC
Metropolitan MEUC12DCT	8	Mesa	286	DC
ANDSLITE ELEGANT SOLAR	8	Mesa	320	DC
NIWA ECO Air 16	9	Mesa	380	DC
NIWA ECO Air 16 UP	9	Pedestal	370	DC
Bright KN-5922D	9	Mesa	286	DC
Rural Spark RSFANV1	10	Mesa	380	DC
NIWA ECO AIR 16" UP	10	Pedestal	380	DC
Metropolitan ME6606-VP	11	Mesa	140	DC
NIWA Eco Air 16" UP	12	Pedestal	385	DC
Metropolitan MEUC16S	12	Pedestal	375	DC
Powering SB-S-16G-A	12	Pedestal	380	DC
SUPER STAR FT35-DC02A	12	Mesa	380	DC
SUNSHINE B09	15	Mesa	360	DC
Solar Fan DC-426	15	Pedestal	380	DC
Power-Solution FT-703	16	Mesa	220	DC

Tabla AII- 6. Catálogo Ventiladores Parte 1 (Elaboración propia)

VENTILADOR					
Tensión Nominal (V)	Caudal aire (m3/min)	Eficiencia energética (m3/min/W)	Num. Velocidades disponibles	Precio (USD)	Altura máxima (cm)
12	12,93	2,73	2	N/A	32
12	6,2	1,9	2	N/A	28,2
11,1	30,33	3,9	3	80,56	60
12	30,72	3,19	3	N/A	46,5
12	17,01	2,73	3	9,91	52
12	41	4,28	3	16	55
12	38	3,97	3	N/A	116
12	24,33	2,77	3	N/A	49
12	32,62	5,93	3	32,02	52
12	35,32	4,5	3	N/A	123
12	7,07	0,87	2	N/A	22
12	34,09	3,46	3	N/A	115
12	27,12	3,94	3	N/A	123
12	28,26	2,86	3	N/A	120
12	36,27	4,31	3	N/A	61
12	37,37	3,76	3	17,28	58
12	20,61	2,45	3	N/A	122
12	9,97	1,24	3	N/A	9,8

Tabla AII- 7. Catálogo Ventiladores Parte 2 (Elaboración propia)

Seleccione horas funcionamiento iluminación	Horas funcionando iluminación	Seleccione horas funcionamiento TV	Horas funcionando TV	Seleccione horas funcionamiento ventilador	Horas funcionando ventilador	Seleccione horas funcionamiento cargador	Horas funcionando cargador
<input type="checkbox"/> 00-1 h	6-7	<input type="checkbox"/> 00-1 h	8-9	<input type="checkbox"/> 00-1 h	12-13	<input type="checkbox"/> 00-1 h	19-20
<input type="checkbox"/> 1-2 h	19-20	<input type="checkbox"/> 1-2 h	14-15	<input checked="" type="checkbox"/> 1-2 h	13-14	<input type="checkbox"/> 1-2 h	20-21
<input type="checkbox"/> 2-3 h	20-21	<input type="checkbox"/> 2-3 h	20-21	<input type="checkbox"/> 2-3 h	14-15	<input type="checkbox"/> 2-3 h	21-22
<input type="checkbox"/> 3-4 h	21-22	<input type="checkbox"/> 3-4 h	21-22	<input type="checkbox"/> 3-4 h	15-16	<input type="checkbox"/> 3-4 h	22-23
<input type="checkbox"/> 4-5 h	22-23	<input type="checkbox"/> 4-5 h		<input type="checkbox"/> 4-5 h	16-17	<input type="checkbox"/> 4-5 h	
<input type="checkbox"/> 5-6 h		<input type="checkbox"/> 5-6 h		<input type="checkbox"/> 5-6 h	17-18	<input type="checkbox"/> 5-6 h	
<input checked="" type="checkbox"/> 6-7 h		<input type="checkbox"/> 6-7 h		<input type="checkbox"/> 6-7 h		<input type="checkbox"/> 6-7 h	
<input type="checkbox"/> 7-8 h		<input type="checkbox"/> 7-8 h		<input type="checkbox"/> 7-8 h		<input type="checkbox"/> 7-8 h	
<input type="checkbox"/> 8-9 h		<input checked="" type="checkbox"/> 8-9 h		<input type="checkbox"/> 8-9 h		<input type="checkbox"/> 8-9 h	
<input type="checkbox"/> 9-10 h		<input type="checkbox"/> 9-10 h		<input type="checkbox"/> 9-10 h		<input type="checkbox"/> 9-10 h	
<input type="checkbox"/> 10-11 h		<input type="checkbox"/> 10-11 h		<input type="checkbox"/> 10-11 h		<input type="checkbox"/> 10-11 h	
<input type="checkbox"/> 11-12 h		<input type="checkbox"/> 11-12 h		<input type="checkbox"/> 11-12 h		<input type="checkbox"/> 11-12 h	
<input type="checkbox"/> 12-13 h		<input type="checkbox"/> 12-13 h		<input checked="" type="checkbox"/> 12-13 h		<input type="checkbox"/> 12-13 h	
<input type="checkbox"/> 13-14 h		<input type="checkbox"/> 13-14 h		<input checked="" type="checkbox"/> 13-14 h		<input type="checkbox"/> 13-14 h	
<input type="checkbox"/> 14-15 h		<input checked="" type="checkbox"/> 14-15 h		<input checked="" type="checkbox"/> 14-15 h		<input type="checkbox"/> 14-15 h	
<input type="checkbox"/> 15-16 h		<input type="checkbox"/> 15-16 h		<input checked="" type="checkbox"/> 15-16 h		<input type="checkbox"/> 15-16 h	
<input type="checkbox"/> 16-17 h		<input type="checkbox"/> 16-17 h		<input checked="" type="checkbox"/> 16-17 h		<input type="checkbox"/> 16-17 h	
<input type="checkbox"/> 17-18 h		<input type="checkbox"/> 17-18 h		<input checked="" type="checkbox"/> 17-18 h		<input type="checkbox"/> 17-18 h	
<input type="checkbox"/> 18-19 h		<input type="checkbox"/> 18-19 h		<input type="checkbox"/> 18-19 h		<input type="checkbox"/> 18-19 h	
<input type="checkbox"/> 19-20 h		<input type="checkbox"/> 19-20 h		<input type="checkbox"/> 19-20 h		<input checked="" type="checkbox"/> 19-20 h	
<input checked="" type="checkbox"/> 20-21 h		<input checked="" type="checkbox"/> 20-21 h		<input type="checkbox"/> 20-21 h		<input checked="" type="checkbox"/> 20-21 h	
<input checked="" type="checkbox"/> 21-22 h		<input checked="" type="checkbox"/> 21-22 h		<input type="checkbox"/> 21-22 h		<input checked="" type="checkbox"/> 21-22 h	
<input checked="" type="checkbox"/> 22-23 h		<input type="checkbox"/> 22-23 h		<input type="checkbox"/> 22-23 h		<input checked="" type="checkbox"/> 22-23 h	
<input type="checkbox"/> 23-24 h		<input type="checkbox"/> 23-24 h		<input type="checkbox"/> 23-24 h		<input type="checkbox"/> 23-24 h	

Ilustración AII- 2. Selección horas funcionamiento equipos (Elaboración propia)

Equipo	Equipos seleccionados en catálogos	Consumo horario (Wh)	Num. Luces o teléfonos a cargar	Fact. Sim	Tiempo uso total/día (h)
Iluminación	Fosera Ceiling Lamp 100	0,78	3	0,75	5
Frigorífico	Phocos FR230-B	8,041666667	-	-	24
TV	Zimpertec TV-DVB-T2/S2-19"	10	-	-	4
Ventilador	Metropolitan MEUC12DCT	8	-	-	6
Cargador móvil	Cargador estándar	5	2	-	4
TOTAL					43
ratio respecto TOTAL					

Tabla AII- 8. Resultados selección equipos demanda con frigorífico (Elaboración propia)

Equipo	Consumo horario (Wh)											
	00-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Iluminación	0	0	0	0	0	0	1,755	0	0	0	0	0
Frigorífico	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04
TV	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0
Ventilador	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cargador móvil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	9,9	8,04	18,04	8,04	8,04	8,04
ratio respecto TOTAL	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02

Tabla AII- 9. Resultados consumo equipos demanda con frigorífico 1 (Elaboración propia)

Equipo	Consumo horario (Wh)											
	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Iluminación	0	0	0	0	0	0	0	1,76	1,76	1,76	1,76	0
Frigorífico	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04
TV	0	0	10	0	0	0	0	0	10	10	0	0
Ventilador	8	8	8	8	8	8	0	0	0	0	0	0
Cargador móvil	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	10	0
TOTAL	16,04	16,04	26,04	16,04	16,04	16,04	8,04	19,80	29,80	29,80	19,80	8,04
ratio respecto TOTAL	0,05	0,05	0,08	0,05	0,05	0,05	0,02	0,06	0,09	0,09	0,06	0,02

Tabla AII- 10. Resultados consumo equipos demanda con frigorífico 2 (Elaboración propia)

Equipo	Consumo total (Wh)	Consumo diario (Wh)	Consumo nocturno (Wh)
Iluminación	8,78	3,51	5,27
Frigorífico	193	112,58	80,42
TV	40	20	20
Ventilador	48	48	0
Cargador móvil	40	10	30
TOTAL	329,78	194,09	135,68
ratio respecto TOTAL	1	0,59	0,41

Tabla AII- 11. Resultados Consumo total demanda con frigorífico (Elaboración propia)