



**Universidad Politécnica de Madrid**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

---

# **Electrificación de zonas rurales aisladas en África (Nikki)**

---

**Mónica Mesa Lozano**

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Tutelado por:**

Jaime Rodríguez Arribas

**Noviembre de 2017**



El presente trabajo, titulado *Electrificación de zonas rurales aisladas en África*, recoge la memoria correspondiente a la asignatura Trabajo de Fin de Grado que presenta D<sup>a</sup> Mónica Mesa Lozano como parte de su formación para aspirar al Título de Grado en Tecnologías Industriales. Este trabajo ha sido realizado en colaboración con OAN Internacional.



# Agradecimientos

El Trabajo de Fin de Grado representa el cierre de cuatro años de estudios, de los cuáles una vez en este punto, solo me queda agradecer a todos los que han hecho posible que crezca y que no me detenga en conseguir mis objetivos con alegría y pasión.

A Jaime Rodríguez Arribas, mi tutor del proyecto, por su compromiso y dedicación estos meses de trabajo. Por aceptar mi proposición de idea de TFG sabiendo que era un tema completamente desconocido para mí, pero compartir conmigo las ganas y motivación que incitan a realizar un proyecto con fines humanitarios. Por su trato y disponibilidad constante ante cualquier duda que pudiera surgirme.

A mi familia y a Mateo, por estos años de apoyo incondicional y haber creído en mí, valorando mi dedicación y esfuerzo requeridos por la carrera. Nunca podrán ser suficientemente agradecidas la paciencia y ayuda brindada por cada uno de ellos y todo lo que me han enseñado.

A mis amigos de la universidad, Maru, Lore, Bea y Miguel, por haber hecho de mi paso por la Escuela una magnífica época, a pesar de cualquier momento malo por el que hayamos pasado. Agradezco infinitamente todo lo que han ayudado a mejorar tanto a nivel académico como personal.

A Javier García de Jalón, un punto de referencia en la Escuela, tanto como profesor como amigo. Por su constante disposición a ayudarnos y escucharnos en todo lo posible, sin él mi paso por la Escuela no hubiera sido lo mismo.

A OAN, por realizar una labor tan bonita en Nikki. Una mención especial tanto al presidente, Daniel Alfaro como al director de proyectos Alberto Gimeno, cuya disponibilidad siempre era total para cualquier consulta.

Por último, agradecer a todo el personal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, que me han acompañado durante estos cuatro años y me han permitido aprender tanto de tantas cosas.

Gracias a todos vosotros, desde el corazón.



# Índice de contenidos

Agradecimientos.....	5
Índice de contenidos.....	7
Índice de figuras.....	9
Índice de tablas.....	11
Resumen.....	1
Capítulo 1: Introducción.....	7
1.1 Motivación.....	7
1.2 Objetivos del Trabajo de Fin de Grado .....	8
1.3 Estructura del documento .....	9
Capítulo 2: Antecedentes y características de la demanda.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.1.1 Estudio demográfico .....	11
2.1.2 Marco económico y energético de Benín.....	12
2.2 Situación energética actual en Benín.....	16
2.3 Principales problemas eléctricos en Nikki.....	18
2.4 Aspectos políticos y legales.....	20
Capítulo 3: Requisitos de diseño .....	21
3.1 Climatología .....	21
3.1.1 Temperatura y precipitaciones .....	21
3.1.2 Viento.....	22
3.1.3 Radiación solar.....	22
3.2 Demanda por poblados .....	25
Capítulo 4: Alternativas planteadas.....	29
4.1 Tecnologías energéticas posibles.....	29
4.1.1 Hidráulica.....	29
4.1.2 Eólica .....	30
4.1.3 Solar .....	30
4.2 Índice de factores a considerar .....	32
Capítulo 5: Componentes en una instalación solar fotovoltaica .....	35
5.1 Funcionamiento de una instalación solar FV .....	35
5.2 Panel fotovoltaico .....	38
5.2.1 Parámetros de un panel fotovoltaico.....	41
5.3 Regulador.....	45
5.4 Acumulador .....	46
5.4.1 Parámetros del acumulador.....	47

5.5 Inversor.....	49
5.6 Esquema general.....	50
Capítulo 6: Diseño y desarrollo de la instalación solar fotovoltaica.....	51
6.1 Diseño.....	52
6.1.1 Datos previos .....	52
6.1.2 Potencia reactiva .....	53
6.1.3 Paneles fotovoltaicos .....	55
6.1.4 Acumulador.....	56
6.1.5 Inversor .....	57
6.1.6 Regulador.....	58
6.1.7 Conexión de los equipos .....	58
6.2 Montaje y puesta en marcha .....	61
6.3 Mantenimiento y evaluación .....	63
6.3.1 Mantenimiento de la instalación .....	63
6.3.2 Evaluación de la instalación.....	65
Capítulo 7: Conclusiones y desarrollos futuros.....	67
Capítulo 8. Planificación temporal.....	69
8.1 Estructura de Descomposición del Proyecto .....	69
8. 2 Diagrama de Gantt.....	71
Capítulo 9: Presupuesto.....	73
9.1 Presupuesto relacionado con la elaboración del TFG .....	73
10.2 Presupuesto relacionado con la instalación FV .....	74
Capítulo 10: Impacto del proyecto .....	75
10.1 Impactos económicos .....	75
10.2 Impactos medioambientales .....	76
10.3 Impactos sociales.....	77
<b>Referencias.....</b>	<b>78</b>

# Índice de figuras

Figura 1: Ubicación de Benín. FUENTE: [1] .....	1
Figura 2: Distribución de electricidad en Benín. FUENTE: [14] .....	2
Figura 3: Perfil de potencia demandada diaria. FUENTE: Elaboración propia.....	2
Figura 4: Comparación de potencia demandada y recibida por el Sol. FUENTE: Elaboración propia.....	3
Figura 5: Esquema de la instalación FV. FUENTE: Elaboración propia.....	4
Figura 6: Situación de la instalación propuesta. FUENTE: Elaboración propia y Google Earth .....	4
Figura 7: Ubicación de Benín. FUENTE: [1] .....	11
Figura 8: Evolución de la población en Benín. FUENTE: [3].....	12
Figura 9: División por departamentos. FUENTE: OAN Internacional.....	12
Figura 10: IDH. FUENTE [5] .....	13
Figura 11: Radiación mundial (W/m <sup>2</sup> ).FUENTE: [10] .....	14
Figura 12: Capacidad instalada Vs opción posible más sostenible. FUENTE: Power Africa .	15
Figura 13 Principales países importadores de energía de Benín. FUENTE: Google Earth .....	16
Figura 14: Zonas electrificadas y no electrificadas en Benín. FUENTE: [14] .....	17
Figura 15: División del territorio de la comuna de Benín. FUENTE [14].....	18
Figura 16: Acceso a la electricidad en Benín (% de población). FUENTE: Banco Mundial [16] .....	19
Figura 17: Temperaturas y precipitaciones en Nikki. FUENTE: [19] .....	21
Figura 18: Fuente solar. FUENTE: [21].....	23
Figura 19: Exposición radiante en Nikki anual. FUENTE: [22].....	24
Figura 20: Consumo eléctrico horario en un día en Nikki. FUENTE: Elaboración propia .....	26
Figura 21: Tarifas de electricidad en Benín. FUENTE: OAN Internacional .....	27
Figura 22: Energía renovable para electricidad en España. FUENTE: [24] .....	29
Figura 23: Comparación entre hibridación FV-diésel y FV-baterías. FUENTE: [25].....	31
Figura 24: Tipos de semiconductores en naranja. FUENTE: Curso de Fuentes de Energía, ETSII .....	35
Figura 25: Conducción en una unión NP. FUENTE: [26] .....	36
Figura 26: Circuito eléctrico representativo de una célula FV. FUENTE: [26] .....	37
Figura 27: Circuito equivalente de una célula. FUENTE: [26].....	37
Figura 28: Tipos de paneles fotovoltaicos. FUENTE: [27] .....	38
Figura 29: Ejemplo práctico de conexión en serie. FUENTE: [28] .....	39
Figura 30: Ejemplo práctico de conexión en paralelo. FUENTE: [28].....	39
Figura 31: Ejemplo práctico de conexión mixta. FUENTE: [28] .....	40
Figura 32: Elementos de un panel fotovoltaico. FUENTE: [29].....	41
Figura 33: Curva característica de una célula FV. FUENTE: [30] .....	41
Figura 34: Valores de eficiencias (%) de las células FV. FUENTE: [31] .....	42
Figura 35: Curva IV con temperatura variable. FUENTE: [33] .....	43
Figura 36: Curva IV con irradiación variable. FUENTE: [33] .....	44
Figura 37: Ejemplo de funcionamiento de TeslaPowerwall. FUENTE: [34] .....	46
Figura 38: Relación entre la capacidad y la profundidad de carga. FUENTE: [35] .....	48
Figura 39: Instalación FV aislada. FUENTE: [30] .....	50
Figura 40: Instalación FV conectada en red. FUENTE: [30].....	50
Figura 41: Comparación de potencias demandada y recibida. FUENTE: Elaboración propia	53
Figura 42: Perfil de demanda horaria de la comunidad. FUENTE: Elaboración propia .....	54
Figura 43: Curvas de I-V en función de temperatura e irradiación. FUENTE: [39].....	55
Figura 44: Esquema de la instalación FV. FUENTE: Elaboración propia.....	60

Figura 45: Situación de la instalación propuesta. FUENTE: Elaboración propia y Google Earth	62
Figura 46: Situación detallada de la instalación. FUENTE: Elaboración propia y Google Earth	62
Figura 47 Estructura de Descomposición del proyecto. FUENTE: Elaboración Propia. ....	70
Figura 48: Diagrama de Gantt. ....	72
Figura 49: División de impactos del Trabajo de Fin de Grado. FUENTE: Elaboración propia	75

# Índice de tablas

Tabla 1: Fenómenos metereológicos en Benín. FUENTE: [20] .....	22
Tabla 2: Mapa de vientos en Nikki. FUENTE: OAN Internacional .....	22
Tabla 3: Distribución de aparatos eléctricos en Gahmarou y Gourou. FUENTE: Elaboración propia.....	25
Tabla 4: Consumo por casa o tienda en Nikki. FUENTE: Elaboración propia .....	27
Tabla 5: Modelo de factores ponderados. FUENTE: Elaboración propia .....	33
Tabla 6. Tipos de baterías. FUENTE: Elaboración propia .....	46
Tabla 7: Parte sociológica de un proyecto. FUENTE: Elaboración propia .....	51
Tabla 8: Parte técnica de un proyecto. FUENTE: Elaboración propia .....	51
Tabla 9: Factor de potencia de 5 grupos de consumo. FUENTE: Elaboración propia .....	54
Tabla 10: Características panel fotovoltaico. FUENTE: Elaboración propia, [39] .....	55
Tabla 11: Características batería. FUENTE: Elaboración propia y [40].....	57
Tabla 12: Características inversor. FUENTE: Elaboración propia y [40] .....	57
Tabla 13: Características regulador. FUENTE: Elaboración propia: [42] .....	58
Tabla 14: Mantenimiento de elementos en una instalación FV. FUENTE: Elaboración propia .....	64
Tabla 15: Costes asociados a recursos materiales. FUENTE: Elaboración propia .....	73
Tabla 16: Costes relacionados a recursos humanos. FUENTE: Elaboración propia .....	73
Tabla 17: Inversión inicial aproximada de la instalación FV. FUENTE: Elaboración propia. 74	



## Resumen

Actualmente, a pesar de considerar la electricidad como una necesidad básica y pilar en la vida de todo país o comunidad, en África, más de 600 millones de personas, casi 2/3 de la población, viven sin suministro eléctrico. Millones de familias y hogares dependen de fuentes de energía tradicionales que se traducen en tecnologías contaminantes, costosas, y lo que es más importante, negativas para la salud humana. Esta situación supone, sin duda, el impedimento fundamental para el avance y desarrollo de estos países. Organizaciones como OAN Internacional (colaboradora en este trabajo) tienen como una de sus prioridades la universalización de la electricidad, promoviendo la transición del continente africano hacia las energías limpias y renovables.

En concreto, Benín, donde se encuentra la comuna de Nikki, forma parte del conjunto de países menos desarrollados energéticamente de África Occidental. El 85% de la electricidad proviene de Ghana, Nigeria y Costa de Marfil y los productos petrolíferos consumidos son, en su totalidad, de origen externo. Esta situación de dependencia tan elevada hace a Benín un país muy vulnerable a cualquier tipo de fluctuación que sufran sus países vecinos. Debido a ello, el consumo de energía en este país es, aproximadamente, la mitad del de los países de África Subsahariana y menos de una cuarta parte de la media mundial. Estos datos se ven reflejados en la tasa de electrificación, que supone solamente un 27%, siendo el de las zonas urbanas un 54% y el de las rurales un 4%.

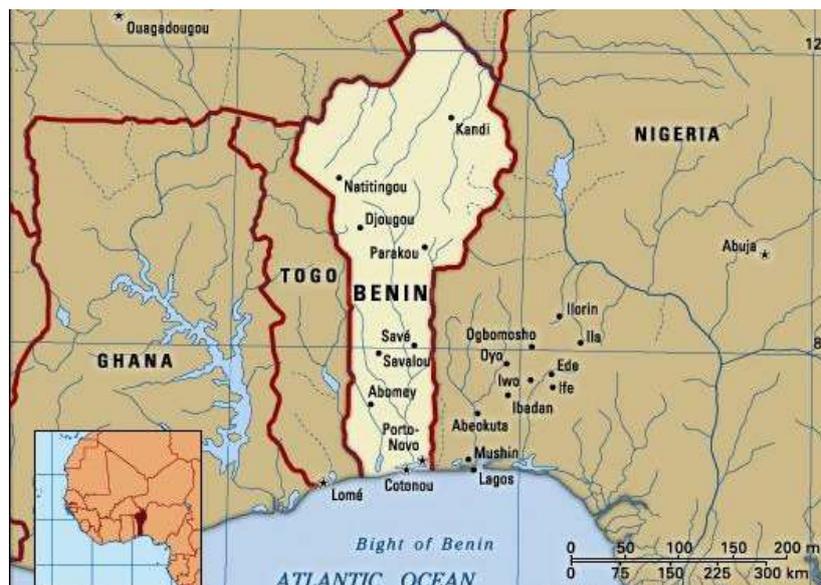


Figura 1: Ubicación de Benín. FUENTE: [1]

El objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Grado es buscar una posible solución para electrificar una zona rural de Benín, la comuna de Nikki, que difícilmente puede obtenerla de manera convencional. Nikki es una de las ocho comunas pertenecientes a Borgou, uno de los doce departamentos en los que se divide Benín. La situación actual, dentro de un marco energético, de esta comuna es inferior a la media del país debido a que el único proveedor de electricidad, la Société Béninoise d'Énergie Électrique (SBEE), se ha centrado, en las últimas décadas, en zonas urbanas céntricas y más ricas. A esto se añade el escaso capital nacional dedicado a este fin.

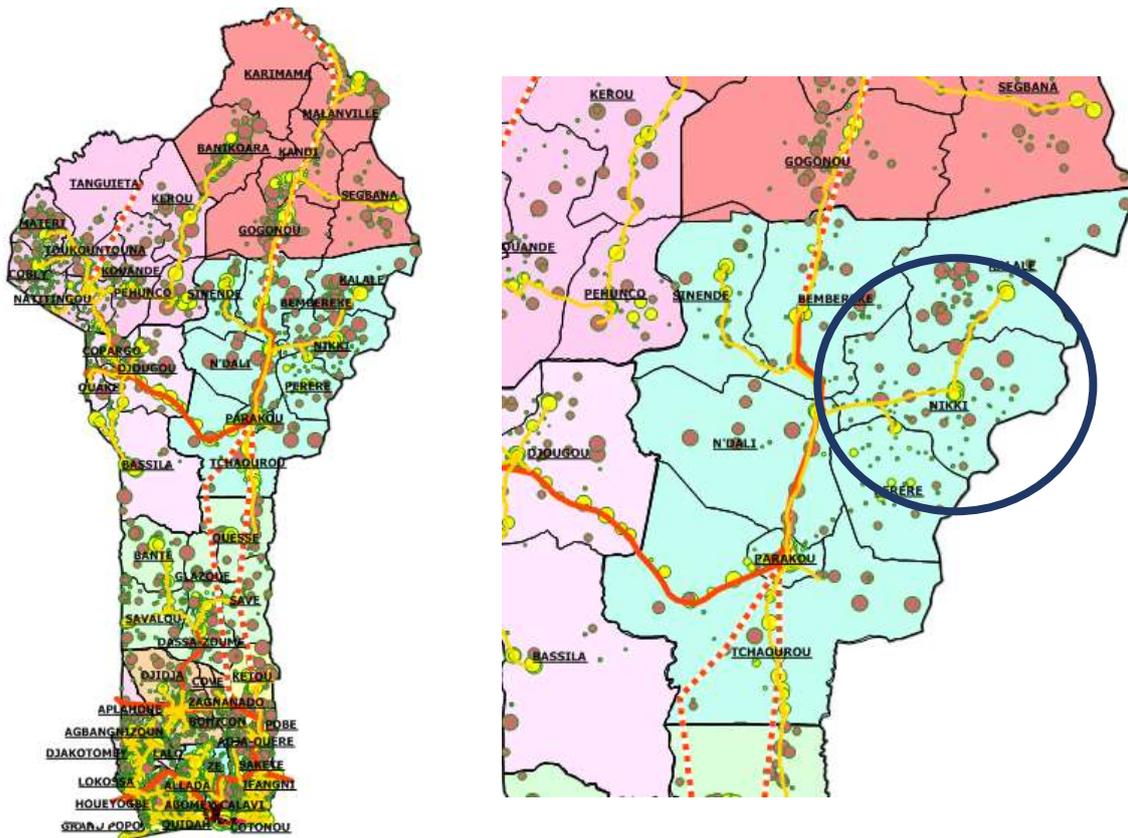


Figura 2: Distribución de electricidad en Benín. FUENTE: [14]

Para poder llevar a cabo la ejecución de un proyecto de electrificación, el paso inicial es conocer qué forma de obtención de electricidad es la más adecuada. Para ello, se ha realizado una investigación centrada en la climatología de Nikki, tanto de temperaturas, viento y precipitaciones como de radiación solar. Algunos aspectos a destacar son las temperaturas elevadas del país pero sin demasiadas fluctuaciones a lo largo del año, las bajas velocidades del viento y la elevada radiación solar recibida gracias a su situación en el “Cinturón del Sol”. La segunda parte después del estudio climatológico, es el estudio de la demanda de la comunidad. Los datos de partida de consumo, aportados por OAN, fueron de dos de los siete poblados en los que se encuentra dividida Nikki, Gahmarou y Gourou. Estos dos poblados suponen las zonas con la demanda más alta de electricidad, en contraposición con los otros cinco. Para establecer el perfil de potencia demandada a lo largo de un día se realizaron hipótesis desde un marco crítico para explicar la distribución del consumo de la manera más fiable posible. Cabe destacar que las necesidades de abastecimiento se extienden al sector doméstico y productivo.



Figura 3: Perfil de potencia demandada diaria. FUENTE: Elaboración propia

Una vez realizadas las investigaciones y estudios anteriores sobre identificación y cuantificación de las necesidades eléctricas, se procede a la selección de la alternativa más adecuada. El criterio de selección de este tipo de tecnología se ha realizado a través de la elaboración de un índice de factores a considerar y bajo los siguientes criterios:

- Promover el desarrollo autóctono, evitando en la medida de lo posible la dependencia con otros países.
- Potenciar el empleo de los habitantes de Nikki, integrándoles desde la primera etapa del proceso.
- Capacidad de crecimiento gracias a una tecnología modular y descentralizada.
- Satisfacer la demanda con fiabilidad.
- Reducir el presupuesto, evitando grandes inversiones.

Tras el análisis de las alternativas válidas para comunidades rurales aisladas, el resultado obtenido y por tanto la tecnología a implantar, es la solar fotovoltaica. Se ha optado por ella debido a que el Sol es un reactor nuclear seguro, limpio, local, inagotable y barato y las fluctuaciones de irradiación mensuales en Nikki son muy bajas.

El siguiente paso es la parte del diseño de la instalación, para ello se ha elaborado una base teórica, es decir, un capítulo que comprende las descripciones de cada componente que la forma, así como los parámetros principales a tener en cuenta a la hora de dimensionarla. Seguido de ello se desarrolla el cálculo de la instalación, el dimensionado utilizando el método del “mes peor” y teniendo presente el equilibrio y proporción justa de todos los equipos que la forman. El punto de partida es conocer tanto la energía diaria demandada (181kWh) como la energía recibida por el Sol en el “mes peor” (0,66kWh), y por tanto, los metros cuadrados de paneles solares (181m<sup>2</sup>).

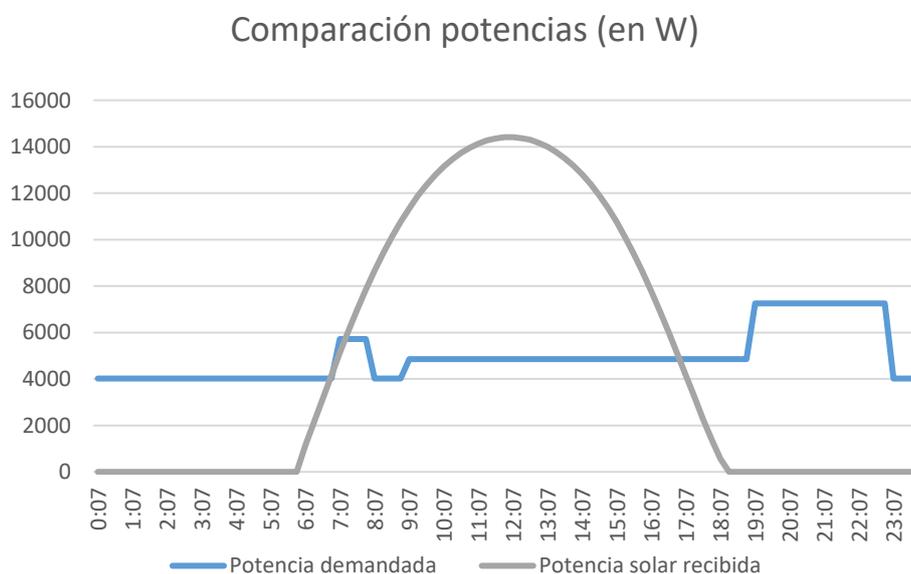


Figura 4: Comparación de potencia demandada y recibida por el Sol. FUENTE: Elaboración propia

Algunos aspectos a considerar en la etapa de dimensionado han sido el mal factor de potencia que presentan algunos aparatos consumidores, la utilización de baterías de litio que aportan mucha más fiabilidad y la agrupación de paneles solares en cinco, con dos líneas en paralelo y cada una de ellas con 10 en serie (en total 120 paneles).

## Resumen

Se presenta a continuación un esquema simplificado de la instalación junto con algunos parámetros a destacar:

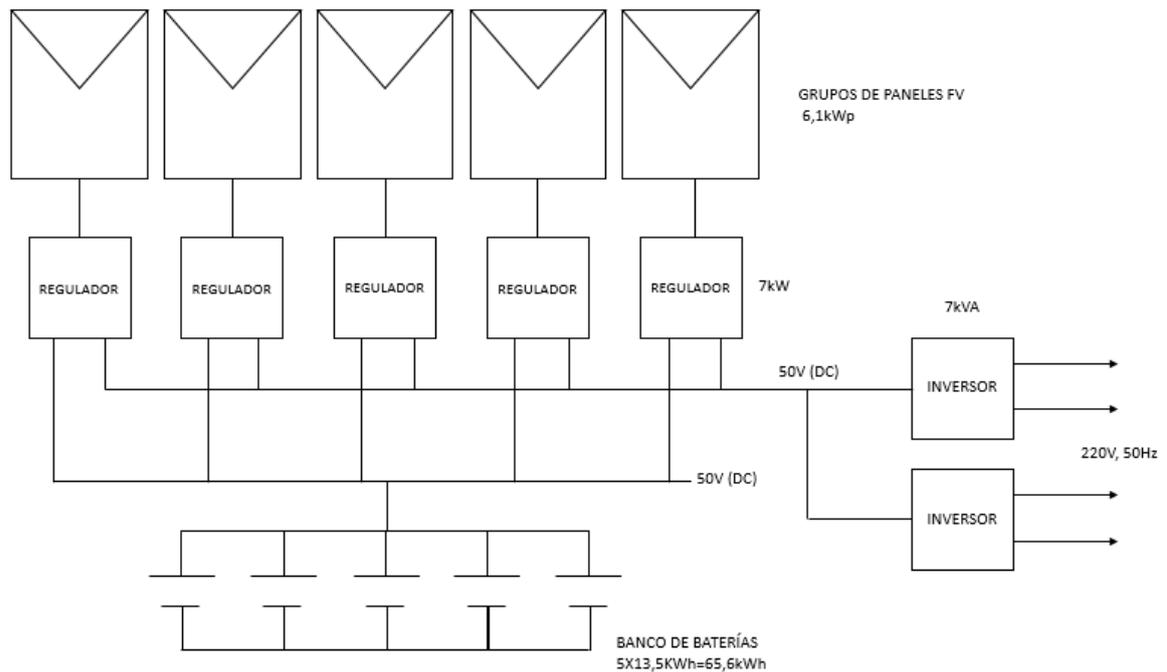


Figura 5: Esquema de la instalación FV. FUENTE: Elaboración propia

Para finalizar el proceso de desarrollo de la instalación fotovoltaica, se describen las etapas de emplazamiento de la instalación, el mantenimiento y la evaluación, siendo estas dos últimas fundamentales para alcanzar el éxito del proyecto.

En esta imagen, se puede apreciar la zona de mayor acumulación de población de Nikki, que apenas llega a los 7km<sup>2</sup>, el cuadrado rojo representaría la situación de la instalación con un área aproximada de 330m<sup>2</sup>.

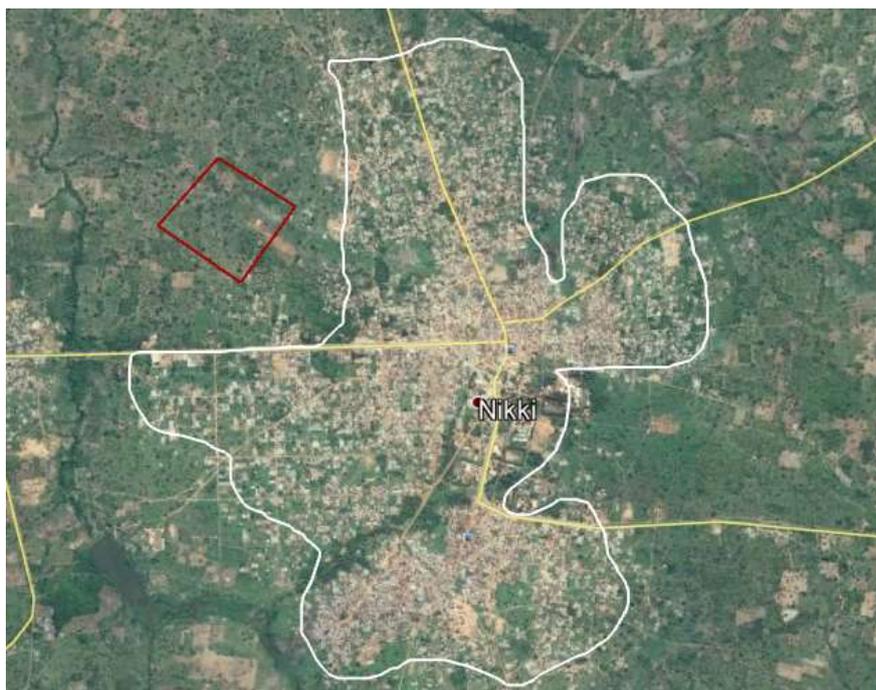


Figura 6: Situación de la instalación propuesta. FUENTE: Elaboración propia y Google Earth

Una característica que se ha intentado respetar durante toda la realización del trabajo es la importancia del marco social y cultural, ya que limitar cualquier proyecto ingenieril al ámbito técnico exclusivamente supondría el fracaso del mismo. Por ello se ha prestado especial atención a la integración de la comunidad de Nikki a la instalación desde el comienzo.

El efecto más trascendental que se pretende conseguir con el proyecto es la capacidad de autogestión de la población de Nikki, con respecto a la situación anterior. Gracias a ello, podrán ser artífices de su propia evolución y desarrollo, mejorando su calidad de vida y, en general, dando un paso más hacia delante para alcanzar la universalización de la electricidad.



# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Motivación

Hoy en día, a pesar de considerar la electricidad como una necesidad básica en muchos países, hay otros muchos donde existe una gran cantidad de poblaciones aisladas de la red eléctrica. Esto se debe a que se encuentran muy alejados para conectarse o, simplemente, no existe red. La dependencia de combustibles tradicionales, tales como la leña o el petróleo, para cubrir sus necesidades energéticas suponen un gran impedimento en el desarrollo y avance de la población. Por ello, es necesario comenzar a difundir la electrificación entre todos los países, convirtiéndolo en deberes primordiales para el gobierno de cada uno de estos. Es fundamental, además, el apoyo de las ONGs, que gracias a sus colaboraciones altruistas mejorar cada día la vida de muchas personas.

Una de las mayores motivaciones a realizar este Trabajo de Fin de Grado es la parte filantrópica que conlleva. Es una excelente idea que todo el tiempo que se debe dedicar a un trabajo de una importancia y extensión como es este, tenga como resultado la aportación de un granito de arena a intentar cubrir una necesidad en Nikki. El reto de poner a prueba todos los conocimientos adquiridos en la carrera sobre el ámbito energético/eléctrico y, sobretodo, profundizar en este conocimiento para ir un paso más allá, resulta al mismo tiempo gratificante y enriquecedor.

Por último, la oportunidad de poder plantear el diseño de una instalación solar fotovoltaica que sea capaz de electrificar 7 pequeños poblados rurales aislados significará avanzar un poco más en alcanzar la universalización eléctrica. Este trabajo se realizará siempre desde un punto de vista de sostenibilidad técnica, medioambiental, social y económica.

## 1.2 Objetivos del Trabajo de Fin de Grado

El objetivo fundamental que se pretende alcanzar con este proyecto será la selección de la mejor alternativa de generación eléctrica a implantar para mejorar la calidad del suministro de electricidad en Nikki (norte de la República de Benín, África). Los problemas principales a solventar serán la alta frecuencia de cortes del servicio eléctrico o incluso la no existencia de este recurso energético en determinadas zonas.

Para poder hacer frente al problema propuesto es necesario estudiar la situación energética actual de la República de Benín y más concretamente de Nikki, las empresas que suplen la demanda y la manera de proporcionar dicha energía eléctrica.

Con el fin de obtener un estudio completo, se realizará un análisis de los datos climatológicos y de los posibles recursos naturales existentes en la zona. También se estudiará la demanda eléctrica que habría que suplir tanto de viviendas como de las tiendas presentes en los poblados. Para poder analizar dicha demanda, se enfocará el estudio a dos de los siete “arrondissements” o distritos en los que se encuentra dividido Nikki, teniendo en cuenta siempre el posible crecimiento de esta necesidad.

Todo ello se hará con el objetivo principal de evaluar y seleccionar cuál de las posibles alternativas de suministro de electricidad es más adecuada, a través de un índice de factores. Se tendrá en cuenta tanto el coste, como la sostenibilidad, la facilidad de ampliación, la no dependencia de otros recursos energéticos, etc.

Una vez seleccionada el tipo de tecnología más acorde con los resultados obtenidos de los estudios anteriores, se realizará el diseño y dimensionamiento de esta. En esta parte se proporcionará información sobre requisitos que deben cumplir cada equipo, su forma de conexión y posibles marcas que lo suministran, bajo un punto de vista crítico valorando equilibrio entre calidad/precio.

Se incluirá un breve estudio sobre el montaje, puesta en marcha y lugar de emplazamiento de la instalación evaluado desde una perspectiva tanto técnica como social.

Para finalizar, un objetivo fundamental a cumplir será determinar una política para el mantenimiento y evaluación de dicha instalación. Es fundamental la toma de conciencia de los habitantes por el respeto, cuidado y sentimiento de pertenencia del proyecto para que este tenga éxito tanto a corto como a largo plazo y sea capaz de aumentar la calidad de vida de la comunidad de Nikki, el objetivo último de este Trabajo de Fin de Grado.

## 1.3 Estructura del documento

El siguiente proyecto consta de siete capítulos, cuyo contenido se detalla a continuación:

- **Capítulo 1: Introducción**  
Se describe la motivación, planteamiento del problema y objetivos fundamentales a llevar a cabo a lo largo del trabajo y la estructura del mismo.
- **Capítulo 2: Antecedentes y características de la demanda**  
En este capítulo se introduce el planteamiento del problema más en profundidad y realiza un estudio de Benín desde un punto de vista económico y energético. Posteriormente, se presentan los principales problemas energéticos en Nikki (ciudad objeto de estudio) y se valora la situación legal y política existente en el país.
- **Capítulo 3: Requisitos de diseño**  
A continuación se realiza un estudio climatológico de la zona objetivo y se presenta la demanda por poblados que hay que suplir con la tecnología energética seleccionada.
- **Capítulo 4: Tecnologías energéticas disponibles**  
Se realiza una breve descripción sobre las posibles tecnologías más adecuadas a implantar, siempre basándose en la sostenibilidad ambiental. Para decidir cuál es la mejor opción a seleccionar, posteriormente se efectúa un análisis mediante un índice de factores a considerar.
- **Capítulo 5: Componentes en una instalación solar fotovoltaica**  
Una vez elegida la mejor tecnología, se procede a describir de manera teórica los equipos que la componen y sus principales parámetros a considerar.
- **Capítulo 6: Diseño y desarrollo de la instalación solar fotovoltaica**  
En este capítulo se desarrollan las diferentes fases que conllevaría la implantación real. El diseño de la instalación supone la primera etapa, tanto elección de los equipos a instalar como de las conexiones a realizar. La segunda hace referencia al montaje y puesta en marcha incluyendo el emplazamiento final de la instalación y por último el mantenimiento y la evaluación.
- **Capítulo 7: Conclusiones y desarrollos futuros**  
Se exponen las conclusiones finales extraídas del trabajo y los posibles desarrollos y crecimiento de esta a largo plazo.
- **Capítulo 8: Planificación temporal**  
La planificación temporal se realiza a través de una EDP y un diagrama de Gantt donde se describen minuciosamente todas las tareas que se han llevado a cabo.
- **Capítulo 9: Presupuesto**  
Se estima brevemente los posibles recursos económicos consumidos en este trabajo.
- **Capítulo 10: Impacto del proyecto**  
En este último capítulo se realiza un análisis sobre el impacto que provocaría, tanto positivo como negativo, el trabajo en el entorno de desarrollo del mismo.



## Capítulo 2: Antecedentes y características de la demanda

### 2.1 Introducción

A continuación se explicará la situación del país y sus generalidades. Así como la introducción en un marco económico, social, político, legal y energético. Más concretamente, de la necesidad de mejorar el acceso a la energía eléctrica.

#### 2.1.1 Estudio demográfico

La República de Benín es un país africano situado al oeste del continente. Fronterizo con Togo al oeste, Burkina Faso y Níger al norte, Nigeria al este y con el Océano Atlántico al sur. La capital es la ciudad puerto de Porto-Novo, pero la sede del gobierno se encuentra en Cotonú, la ciudad costera más grande de Benín, que es a su vez la capital económica y el mayor núcleo de población. Aunque el idioma oficial de Benín es el francés, también se habla el hausa entre los habitantes musulmanes y el yoruba en la región oeste que hace frontera con Nigeria. Su moneda es el Franco de África Occidental o CFA. El grupo religioso más grande de Benín es el Católico Romano, seguido por el Islam en segundo lugar, aunque también aparecen el Vudú y el Protestantismo.

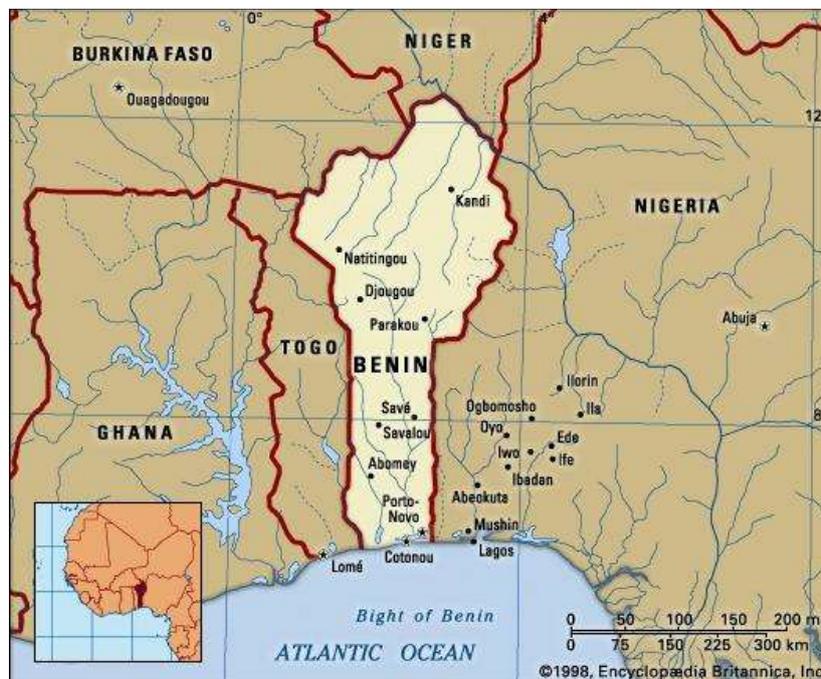


Figura 7: Ubicación de Benín. FUENTE: [1]

## Antecedentes y características de la demanda

Benín ocupa un área de aproximadamente 115.000 km<sup>2</sup> con una población aproximada de 11.167.000 personas, donde el 50,11% del total son mujeres y el 49,89% hombres [2]. La densidad de población media es de 97 habitantes por km<sup>2</sup> y la esperanza de vida al nacer de 53 años. Existe un claro crecimiento de la población a lo largo de las últimas décadas que se representa en el siguiente gráfico.

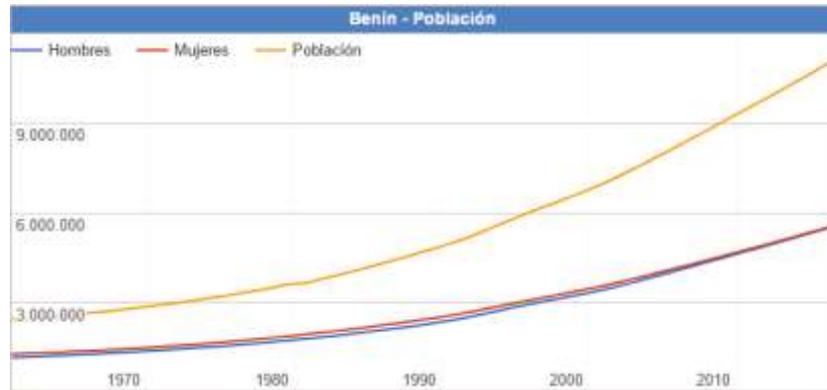


Figura 8: Evolución de la población en Benín. FUENTE: [3]

Benín se encontraba dividido en seis departamentos, que en 1999, se dividieron en dos mitades cada uno dando lugar a los doce actuales. A su vez, se encuentra subdividido en 77 comunas. Estos departamentos son:

- 1-Alibori
- 2-Atakira
- 3-Atlantique
- 4-Borgou
- 5-Collines
- 6-Kuoffo
- 7-Donga
- 8-Littoral
- 9-Mono
- 10-Ouémé
- 11-Plateau
- 12-Zou



Figura 9: División por departamentos. FUENTE: OAN Internacional

### 2.1.2 Marco económico y energético de Benín

En cuanto a la calidad de vida, se utilizará el PIB per cápita como indicador. En el caso de Benín, en 2015, fue de 687€ situándose en la posición 172 de 196 países del ranking de PIB per cápita. Esto quiere decir que la mayor parte de los habitantes tienen un bajísimo nivel de vida, donde aproximadamente el 36,2% de la población vive debajo del umbral de la pobreza [4].

Otro indicador importante para medir el progreso de un país y que en definitiva lo clasifica como desarrollado, en desarrollo o subdesarrollado es el Índice de Desarrollo Humano o IDH. El IDH, un valor numérico comprendido entre 0 (malo) y 1 (ideal), es elaborado por las

Naciones Unidas y es una medida de comparación de tres variables trascendentales: la esperanza de vida al nacer junto con la tasa de mortalidad, la alfabetización y la educación y el nivel de vida y por tanto, el poder adquisitivo [3].



Figura 10: IDH. FUENTE [5]

Tal y como se observa en la figura anterior, África es el continente con una mayor existencia de países subdesarrollados del mundo, en concreto, Benín tiene un 0,476. Las causas de esto son desde económicas y políticas como sociales y geográficas. Sufren grandes epidemias, hambrunas y desnutrición debido al bajo nivel de PIB, lo que conlleva una tasa de mortalidad elevada que se incrementa debido a la falta de servicios sanitarios y de agua potable.

Uno de los factores más relevantes que justifican este bajo IDH es la falta de energía eléctrica. Dos de cada tres habitantes del continente africano no tienen acceso a la electricidad, en Benín concretamente menos del 30% de la población. Solo existen siete países (Camerún, Costa de Marfil, Gabón, Ghana, Namibia, Senegal y Sudáfrica) donde más del 50% de la población sí lo tiene [6].

De acuerdo con un estudio realizado por Luz para África [7], un programa del Fondo Monetario Internacional (FMI) y el Banco Mundial (BM), más de 600 millones de personas y 10 millones de pequeñas empresas carecen de energía eléctrica debido al elevado coste de producción. Esto implica, por lo tanto, la necesidad de recurrir a otro tipo de recurso como es el carbón, el keroseno o las velas, o quien se lo pueda permitir, el uso de generadores diésel que son sucios y muy caros.

Para hacer frente a este problema se han establecido numerosos proyectos locales e internacionales que promueven la transición del continente hacia las energías limpias y renovables. El objetivo fundamental es acabar con los cortes frecuentes de electricidad en muchas ciudades africanas, electrificar zonas rurales aisladas de la red eléctrica, favorecer el crecimiento de la industria y, en definitiva, generar prosperidad en todo el continente. Una de las iniciativas más importantes y que más potencial está teniendo es “Power Africa”, que busca introducir aproximadamente 30.000 megavatios y 60 millones de conexiones en África Subsahariana antes del 2030, impulsando las energías renovables, un medio extraordinariamente efectivo para la electrificación [8].

Las energías renovables son una forma de energía primaria que se encuentran en la naturaleza en una cantidad casi ilimitada, como el sol o el agua. Son energías autóctonas generalmente, gratuitas, ilimitadas y respetuosas con el medio ambiente. Su denominación proviene de la

## Antecedentes y características de la demanda

contraposición con las energías “no renovables”, cuyas reservas tienen carácter agotable. Las principales ventajas de las energías renovables, aplicables en su totalidad al entorno africano son, entre otras:

- Fuentes de energía fácilmente accesibles y a coste reducido o sin coste de combustible. La tecnología y mantenimiento son relativamente sencillos.
- Región en la que se desarrolla mucho más autónoma, ya que impulsa tanto industria como economía del lugar.
- Proyectos modulares, con capacidad de adaptación al entorno familiar o comunitario, y escalables.
- Energías seguras y más respetuosas con el medio ambiente, no suponen riesgos para la salud y sus residuos no crean amenazas para nadie. En consecuencia, tienen un nulo o bajo impacto ambiental sobre el cambio climático.

Una vez estudiadas las amplias ventajas del desarrollo de energías renovables en el continente africano, es necesario conocer el potencial que tiene respecto a estas. De acuerdo a un estudio realizado por Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea, las fuentes de energía renovable con mayor potencial en África son la solar, hidroeléctrica, eólica y geotérmica [9].

- Energía solar: África es el continente más soleado del mundo y la radiación media de sus países es más alta que en el resto de continentes, esto conlleva que el 95% de la luz solar que recibe el planeta en invierno irradia sobre África. Tal y como se observa en la siguiente figura, África se encuentra situado en el conocido “Cinturón del Sol”, franja comprendida entre  $\pm 35^\circ$  del ecuador, lo que hace posible que un mismo panel fotovoltaico podría producir dos veces más electricidad que la que produciría en Europa Central.

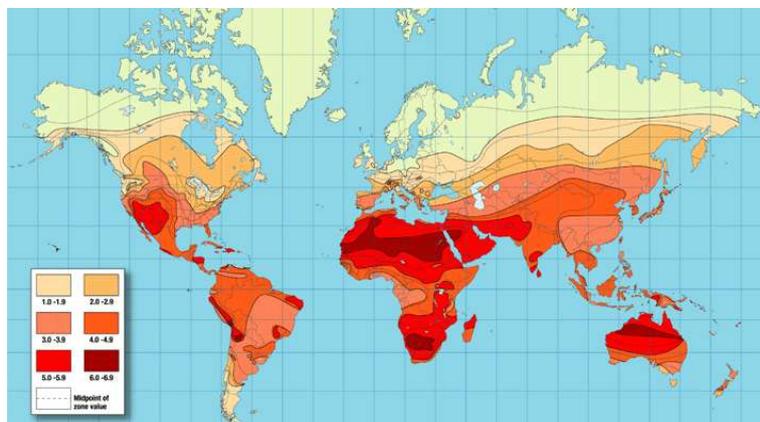


Figura 11: Radiación mundial (W/m2).FUENTE: [10]

- Energía hidroeléctrica: A pesar de explotar únicamente el 7% del potencial hidráulico, la zona de África Ecuatorial tiene un fuerte potencial debido a la extensa red de ríos permanentes.
- Energía eólica: Este tipo de energía está teniendo cada vez más relevancia en países como Túnez, Marruecos o Egipto, y en general, en la zona del norte de África y en la zona sur. Cabe destacar el éxito del parque eólico de las islas de Cabo Verde, debido a los fuertes vientos existentes en dicho archipiélago.

- Energía geotérmica: sin duda, esta fuente de energía está en periodo de explotación pero la zona del Valle del Rift y los países del Cuerno de África están siendo estudiados debido al potencial aparente en este tipo de energía renovable.

De acuerdo al estudio realizado por Power Africa en la parte este de África donde se encuentra el emplazamiento de Benín [6], se puede comprobar en el primer gráfico la casi inexistencia de la aplicación de recursos renovables como medio de obtención de energía. En contraposición, el segundo gráfico presenta la posibilidad existente de crecimiento en la capacidad instalada, sobretodo proveniente de recursos solares y eólicos.

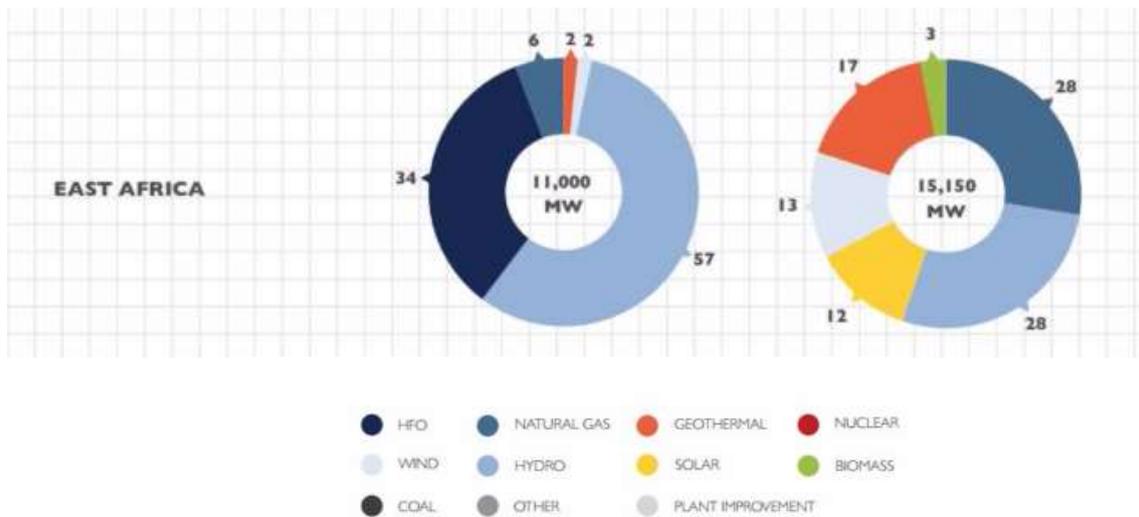


Figura 12: Capacidad instalada Vs opción posible más sostenible. FUENTE: Power Africa



Las líneas de distribución y transmisión del país tienen una longitud de 5620 kilómetros y las transnacionales de 618 kilómetros [11] [13].

A continuación se muestra un mapa de Benín para representar como se distribuye la electrificación a lo largo del país.

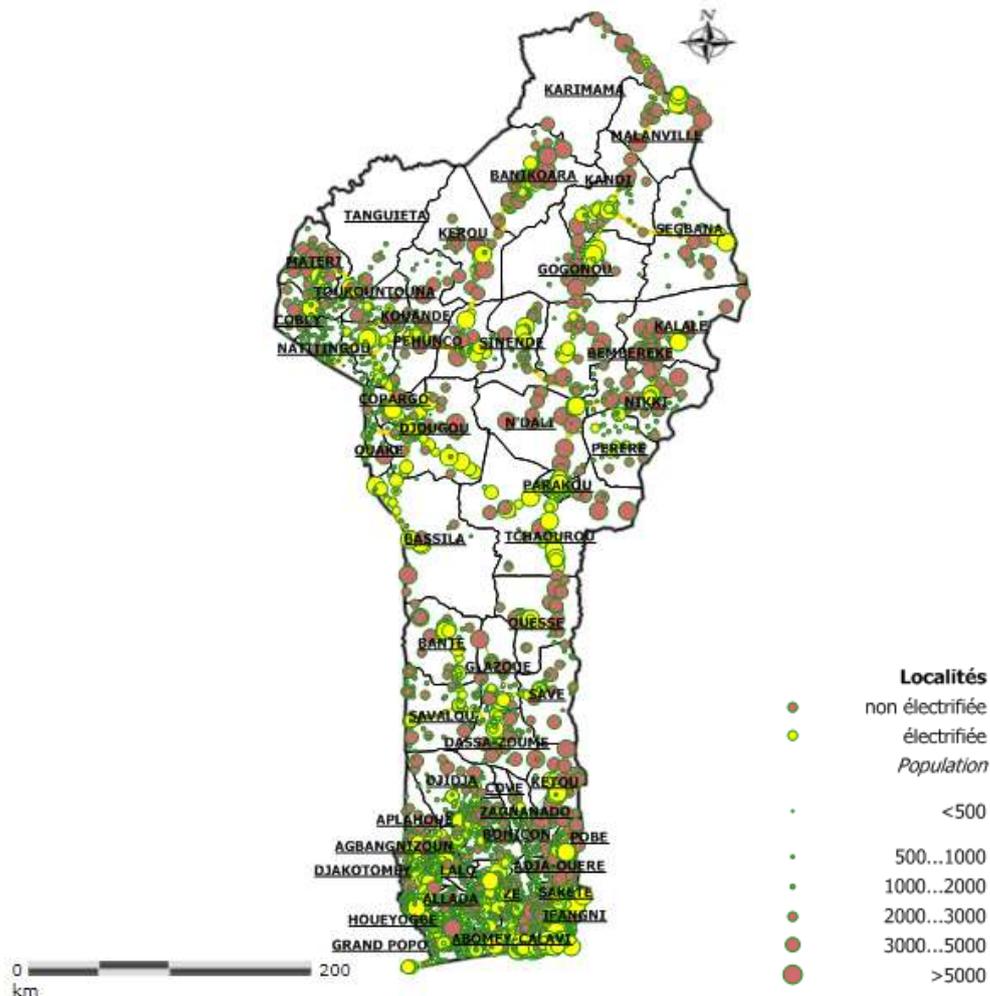


Figura 14: Zonas electrificadas y no electrificadas en Benín. FUENTE: [14]

Benín, como ya se ha citado anteriormente, presenta un elevado potencial en energías renovables pero existen escasos niveles de capacidad interna (ingenieros, electricistas, etc.) y de capital nacional lo que hace que estén prácticamente sin explotar.

El sector de la electricidad presenta, además, una estructura orgánica muy frágil y se caracteriza por su vacío normativo. A pesar de que el Gobierno ha elaborado proyectos legislativos para suplir este vacío jurídico, es importante destacar el trabajo realizado por los organismos no gubernamentales. Estos velan por poder mejorar las condiciones y la calidad de vida de la sociedad de Benín, y en general, la africana. Entre una de estas organizaciones destaca OAN (Objetivo Analizar Nikki), que tiene como objetivo fundamental investigar los recursos existentes en la región y las maneras de actuar en ella intentando impulsar una mejora en la calidad de vida de la población beninesa de Nikki.

Este proyecto, por tanto, se centrará en la correcta búsqueda de cómo electrificar las zonas rurales aisladas de Nikki.

## 2.3 Principales problemas eléctricos en Nikki

Nikki es una de las ocho comunas pertenecientes al departamento de Borgou, que a su vez se divide en siete arrondissements: Biro, Gnonkourakali, Ouénou, Sérékalé, Suya, Tasso y Nikki. . Situada al noroeste, tiene frontera con Nigeria (oeste) y las comunas de Bembèrèkè (nordeste), Kalalé (norte), N'Dali (sudeste) y Pèrèrè (sur). La capital se encuentra en el arrondissement de mayor núcleo de población, Nikki. La comuna presenta una extensión de aproximadamente 3.200 km<sup>2</sup> y una población de 150.000 benineses.

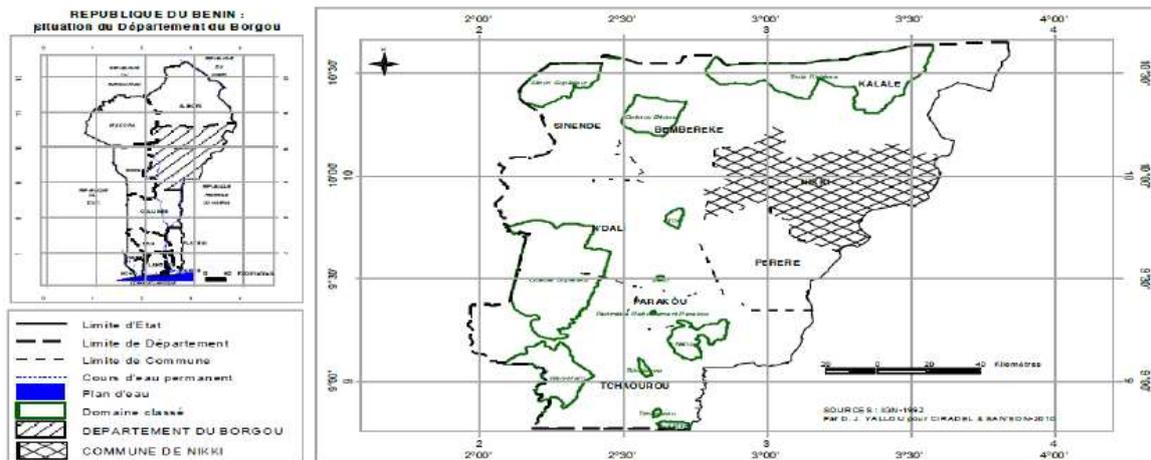


Figura 15: División del territorio de la comuna de Benín. FUENTE [14]

La comuna está formada por pequeñas viviendas tradicionales africanas. Los problemas de espacio que conllevan estas casas generan problemas higiénicos, debido a la mala iluminación y ventilación. También el diseño de las casas impide la correcta incorporación del tendido y cableado eléctrico. A esto se le añade las numerosas caídas y subidas de tensión provocadas por el incorrecto suministro de la red eléctrica, que provocan daños en las máquinas y electrodomésticos usados en las viviendas y las tiendas.

Además es importante tener en cuenta el bajo acceso eléctrico de las zonas rurales, donde se concentra el 60% de la población de Nikki, debido a que la principal suministradora de electricidad (SBEE) se ha centrado fundamentalmente en las últimas décadas en zonas urbanas. Desde 1990 ha conseguido aumentar la tasa de electrificación urbana del 20 al 52,4% pero la rural sigue siendo inferior al 3% [15].

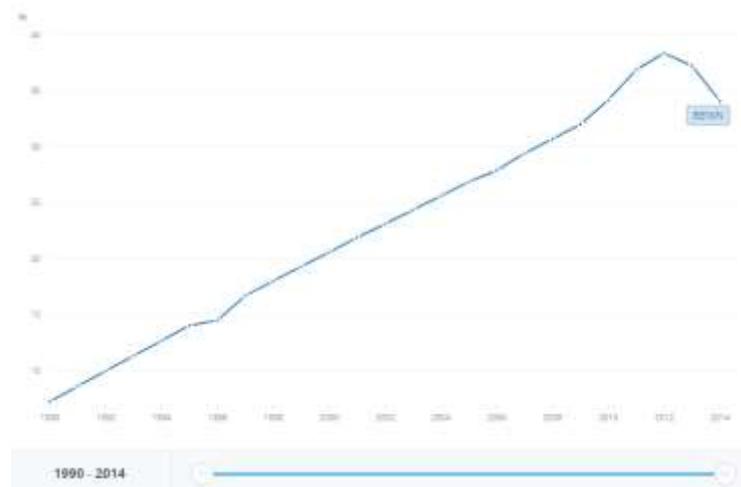


Figura 16: Acceso a la electricidad en Benín (% de población). FUENTE: Banco Mundial [16]

Aunque el gobierno de Benín ha definido una estrategia de electrificación rural, el objetivo de lograr una tasa de electrificación del 40% en zonas rurales para el 2015 fue demasiado ambicioso. Las razones fundamentales fueron: SBEE no tiene suficiente capacidad operativa ni capacidad financiera, el endeudamiento de esta compañía es 9 veces superior a su facturación y las pérdidas financieras están aumentando continuamente ya que los costos de alimentación por kWh superan el precio de venta al por menor, sobretodo en áreas que hacen uso de generadores diésel. Desde principios del 2007 hay que añadir la crisis energética que sufre Benín debido a la dependencia del suministro de Ghana y Costa de Marfil que se vio reducido.

Además, por razones políticas, SBEE se centra últimamente en la extensión de la red a regiones previamente no electrificadas, en lugar de aumentar el número de hogares conectados en las proximidades a la red. Aunque algunas de las responsabilidades para la electrificación rural se han desplazado a la Agencie Beninoise d'Electrification Rurale et d'Energie de Maitrise (ABERME), la compañía demostró la incapacidad de realizar dicho proceso por determinados motivos, entre los que se encuentra fundamentalmente, la falta de experiencia en ingeniería [11].

## 2.4 Aspectos políticos y legales

El gobierno de Benín ha elaborado un informe con el objetivo de definir la organización política del sector eléctrico del país, el marco jurídico para las operaciones de importación, transporte, distribución y generación eléctrica y las maneras de participación de las empresas privadas. Este documento proporciona una visión a largo plazo y una estrategia para cumplir con los retos del sector de energía del país hasta 2025 [17].

La estrategia general a seguir se resume en los siguientes puntos: fortalecer el marco legal e institucional, garantizar un suministro eléctrico continuo y eficaz para transmitir confianza a las actividades industriales y económicas; dotar a toda la población de un fácil acceso a la energía a través del desarrollo de energías renovables, electrificación rural; promover y motivar las inversiones privadas en el sector energético; y crear un sistema eficiente y fiable de energía que aproveche los recursos autóctonos disponibles reduciendo la dependencia respecto a otros países vecinos.

Para poder llevar a cabo la reforma del sector de energía, que tuvo un gran impulso en los últimos años debido a la preocupación presentada por el Banco Mundial y Power Africa, se está discutiendo la posibilidad de la existencia de un fondo de Electrificación Rural [7]. Este fondo será destinado a las inversiones realizadas por donantes designados a la electrificación rural.

Cabe destacar el proyecto que se llevó a cabo en enero del 2017 con la construcción de dos plantas de paneles fotovoltaicos que dio luz a 6.000 habitantes, financiado por diferentes ONGs. No ha sido un caso aislado, en el norte de Benín han surgido ya cinco proyectos desde 1996. Buscan poder suministrar a Benín la energía eléctrica necesaria que no es capaz de producir por si sola [18].

## Capítulo 3: Requisitos de diseño

### 3.1 Climatología

Benín es un país tropical y subsahariano, climatológicamente se divide en dos secciones: el sur donde predomina un clima ecuatorial con cuatro estaciones, gran estación de lluvias (abril a julio), pequeña estación seca (agosto a mitad de septiembre), pequeña estación de lluvias (mitad de septiembre a octubre) y gran estación seca (noviembre a marzo); y el norte caracterizado con dos grandes estaciones, estación seca de noviembre a marzo y lluviosa de junio a septiembre. Mientras el sur posee un clima caliente y húmedo, el del norte es algo más árido. En general se puede clasificar como un clima sudano-guineano. La región a estudiar, Nikki, se encuentra en el norte presentando el clima con dos grandes estaciones.

#### 3.1.1 Temperatura y precipitaciones

Las temperaturas medias de Nikki son elevadas, raras veces bajan de los 18°C, sobre todo durante la estación seca. Durante esta, también se alcanzan las temperaturas más bajas. Esta bajada de temperaturas es consecuencia del harmatán, un viento con origen en el Sahara, es seco, fresco y va cargado de polvo. Por tanto, durante la estación seca es cuando se observa un mayor margen de temperaturas, unos 17°C, donde febrero es el mes más cálido. Durante la estación de lluvias se encuentra el mes más frío del año, y la amplitud de temperaturas es mucho menor, oscilando entre los 20°C y los 30°C.

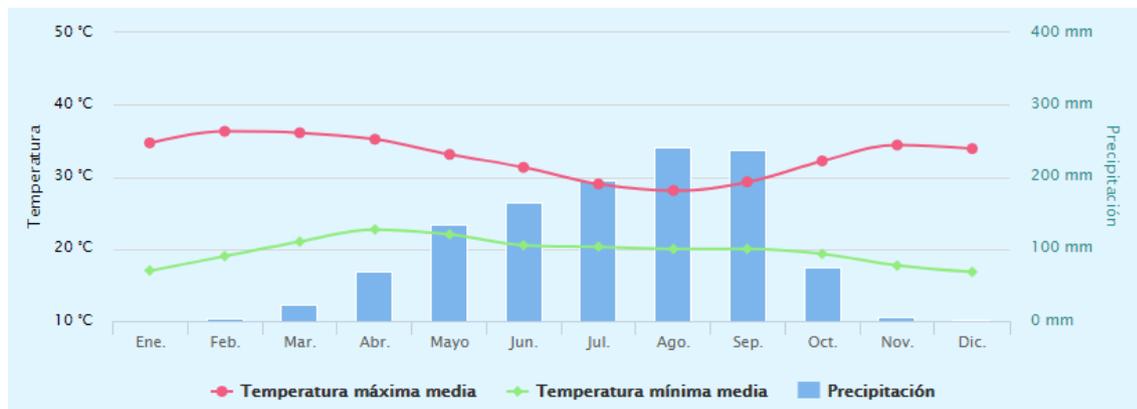


Figura 17: Temperaturas y precipitaciones en Nikki. FUENTE: [19]

A continuación se presenta de manera más genérica el promedio anual de los eventos y tipo de días de cada mes. Se observa el gran peso de los días de tormenta a diferencia del granizo o niebla que no son nada populares en esta zona de África.

## Requisitos de diseño

Eventos (promedio anual)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Días de lluvia	2	5	5	8	14	18	12	6	14	12	6	1
Días de nieve	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Días de granizo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Días de tormenta	3	8	11	12	21	17	5	1	10	22	16	3
Días de niebla	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Días del tornado (contados en 5 años)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Horas del día	12	12	12	2	13	13	13	12	12	12	12	12
Horas de sol diarias	8	8	9	9	8	7	6	7	9	9	9	9

Tabla 1: Fenómenos meteorológicos en Benín. FUENTE: [20]

### 3.1.2 Viento

En la siguiente tabla se muestra las diferentes velocidades del viento cada mes. Se observa que este recurso es insuficiente para poder obtener energía eléctrica ya que los aerogeneradores comenzarían a trabajar con una velocidad de 3 o 4m/s.

Mes	Velocidad viento	Mes	Velocidad viento
Enero	2,30 m/s	Julio	2,37 m/s
Febrero	2,14 m/s	Agosto	2,24 m/s
Marzo	2,64 m/s	Septiembre	1,95 m/s
Abril	2,47 m/s	Octubre	1,94 m/s
Mayo	2,69 m/s	Noviembre	2,20 m/s
Junio	2,43 m/s	Diciembre	2,35 m/s

Tabla 2: Mapa de vientos en Nikki. FUENTE: OAN Internacional

### 3.1.3 Radiación solar

Antes de comenzar a estudiar la radiación solar de Nikki, es necesario presentar brevemente una descripción sobre el concepto.

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas procedentes del Sol. Se expresa en unidades de irradiancia que refleja la potencia por unidad de superficie. El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro y emite radiación solar en todas las longitudes de ondas desde infrarroja hasta ultravioleta, presentando un máximo en la zona visible.

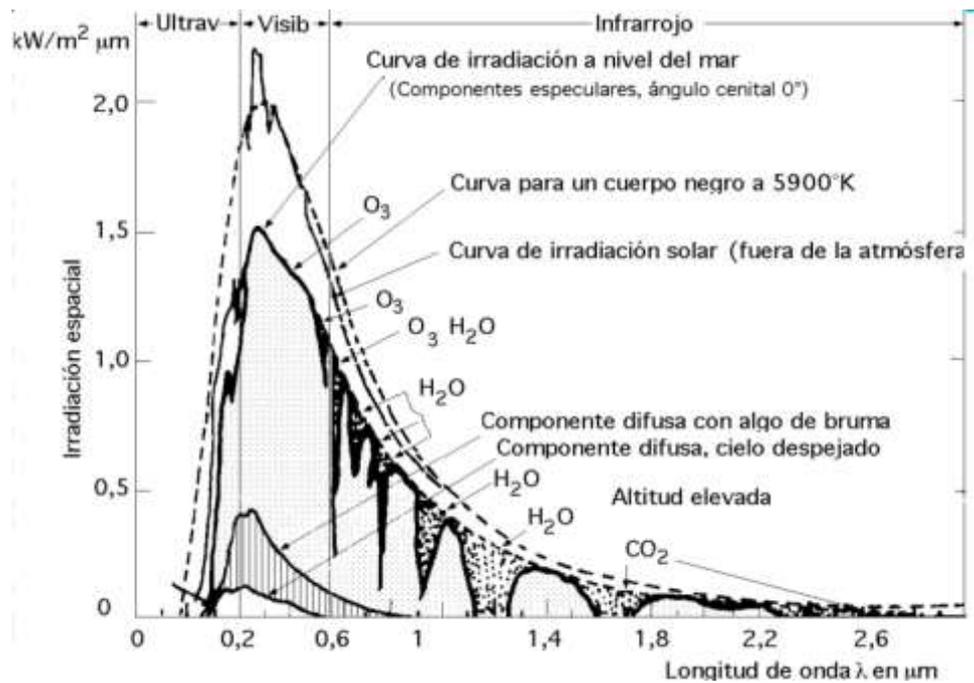


Figura 18: Fuente solar. FUENTE: [21]

Es importante citar y comprender los diferentes componentes de la radiación para poder evaluar la capacidad de generar energía. La radiación directa se define como la radiación solar directamente recibida de la superficie de la tierra, sin sufrir ningún cambio de dirección respecto a la dirección original. La radiación difusa, sin embargo, es la radiación que llega a la superficie terrestre tras haber sufrido los procesos de dispersión de la atmósfera (reflexión y difusión). Por último, se encuentra la radiación reflejada, que como su propio nombre indica es aquella reflejada en la superficie terrestre. La cantidad de radiación dependerá del coeficiente de reflexión de la superficie o albedo. La radiación total es, por tanto, la suma de la radiación directa, difusa y reflejada.

Tal y como se menciona anteriormente, se conoce la potencia instantánea recibida del Sol por unidad de superficie, cuyas unidades son vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Pero también existe la posibilidad de obtener la energía recibida del Sol por medio de la exposición radiante, irradiancia o irradiación, una integral en el tiempo de la potencia, la energía que incide por unidad de superficie. De esta manera, una hora de exposición radiante es una medida de energía por metro cuadrado durante una hora. Es decir, una hora de exposición radiante=irradiación ( $W/m^2$ )\*3600 segundos. Las unidades utilizadas son julios por metro cuadrado ( $J/m^2$ ) o vatios hora por metro cuadrado ( $Wh/m^2$ ). La exposición radiante en Nikki, cuyas coordenadas son 9°55'58"Norte, 3°12'18"Este, se presentan en el siguiente gráfico. Se aprecia que el mes con menos radiación solar es agosto y se tomará como referencia para cualquier cálculo de instalación solar posterior, es decir, el caso más desfavorable.

Un aspecto muy importante a considerar respecto a la radiación solar es la baja fluctuación entre los meses de máxima (marzo) y de mínima (agosto). En otros países como Madrid, la variación entre la máxima y mínima radiación, entre julio y diciembre, es del 65%.

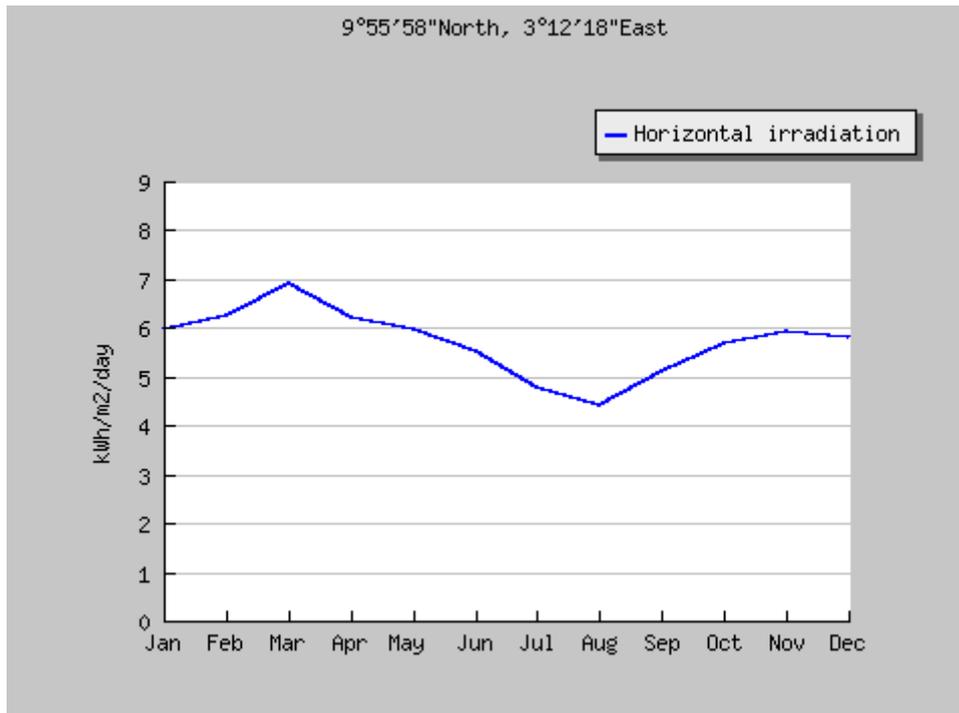


Figura 19: Exposición radiante en Nikki anual. FUENTE: [22]

## 3.2 Demanda por poblados

Para poder elegir la forma de suplir la demanda existente es necesario estudiar en primer lugar la necesidad de energía y cómo se distribuye a lo largo del día. Para poder realizar dicho estudio, se tomarán de muestra dos zonas de la ciudad dentro del arrondissement de Nikki. La organización OAN se encargó de realizar un estudio eléctrico a cada uno de estos dos poblados, Gahmarou y Gourou durante el verano de 2015.

Primero se presentarán los aparatos eléctricos existentes en cada una de las casas y tiendas para hacer un cálculo posterior del consumo de dichos equipos. También es necesario tener en cuenta el número de personas que viven en las casas, las condiciones de uso y la fecha de compra aproximada de los aparatos. Esto es, la televisión se considera una CRT, la radio es antigua, el ventilador es de techo, etc.

APARATOS	GAHMAROU									
	Casa 1	T1-Papelería	Casa 2	Casa 3	T2-MTN	T3-Panadería	T4-Supermercado	Casa 4	Casa 5	Casa 6
Amasador						1				
Antena	1		1					2		2
Bombillas		2		2		2				2
Calentador de agua										1
Congelador	1									1
DVD	2							3	2	
Fotocopiadora									1	
Wifi	1								2	1
Horno						1 (no eléctrico)				
Impresora		1							2	
Móvil		1			1					
Nevera	1		1					1		
Ordenador		1				1			2	
Playstation		1								
Radio										1
Refrigerador							3			
Televisión			3	1			1	1	2	1
Ventilador							5		1	2

APARATOS	GOUROU				
	Casa 1	Casa 2	Casa 3	Casa 4	Casa 5
Amasador					
Antena	1	1	1	2	1
Bombillas					
Calentador de agua			1		
Congelador					
DVD	1			2	1
Fotocopiadora					
Wifi		1	1		
Horno					
Impresora					
Móvil			4		
Nevera					1
Ordenador					
PlayStation					
Radio					
Refrigerador					
Televisión	2	1	3	2	1
Ventilador			3	1	

Tabla 3: Distribución de aparatos eléctricos en Gahmarou y Gourou. FUENTE: Elaboración propia

## Requisitos de diseño

Para poder distribuir el uso de los aparatos a lo largo del día es importante conocer la jornada laboral, de 9 de la mañana hasta las 19 de la tarde y los horarios de salida y puesta de sol pues esto limitará el uso de bombillas y ventiladores.

Ha sido necesario realizar las siguientes consideraciones o hipótesis para establecer un marco crítico para poder explicar la distribución del consumo, debido a los escasos datos desde los que partir.

- A diferencia de un país europeo, no hay distinción en el consumo de electricidad entre fin de semana o día laboral o periodo vacacional y laboral, se mantiene un ritmo constante a lo largo de los días. Con ello se consigue un único perfil diario.
- Se establece un consumo continuo donde tienen cabida neveras, congeladores, refrigeradores de supermercado, wifis y antenas de televisión.
- El consumo de las tiendas se reparte entre las 9 y las 19 de la tarde a excepción del amasador de la panadería que trabajará por la mañana antes de la apertura de tiendas (1h y 20 min).
- La iluminación de las tiendas se reparte entre las 17 y la hora de cierre puesto que amanece a las 6 de la mañana y se considera que a la hora de apertura la luz es la necesaria.
- El consumo doméstico comienza a las 19 de la tarde, con el fin de la jornada laboral y finaliza a las 23 de la noche. Se reflexiona sobre la gran ventaja que ofrece la electricidad sobre el concepto de alargar el día y no que se acabe con la puesta del sol a las 17:30 aproximadamente, por tanto, se considera un uso de bombillas de 5h diarias. El uso de aparatos DVD, ordenadores, ventiladores y cargador de móviles se estima de 2h diarias, la televisión de unas 3h diarias y el uso de la impresora en casa aproximadamente de 10-15 minutos.

A continuación se presenta la distribución en el perfil de consumo eléctrico horario a lo largo de un día en los dos poblados de Nikki, teniendo en cuenta las hipótesis mencionadas anteriormente.

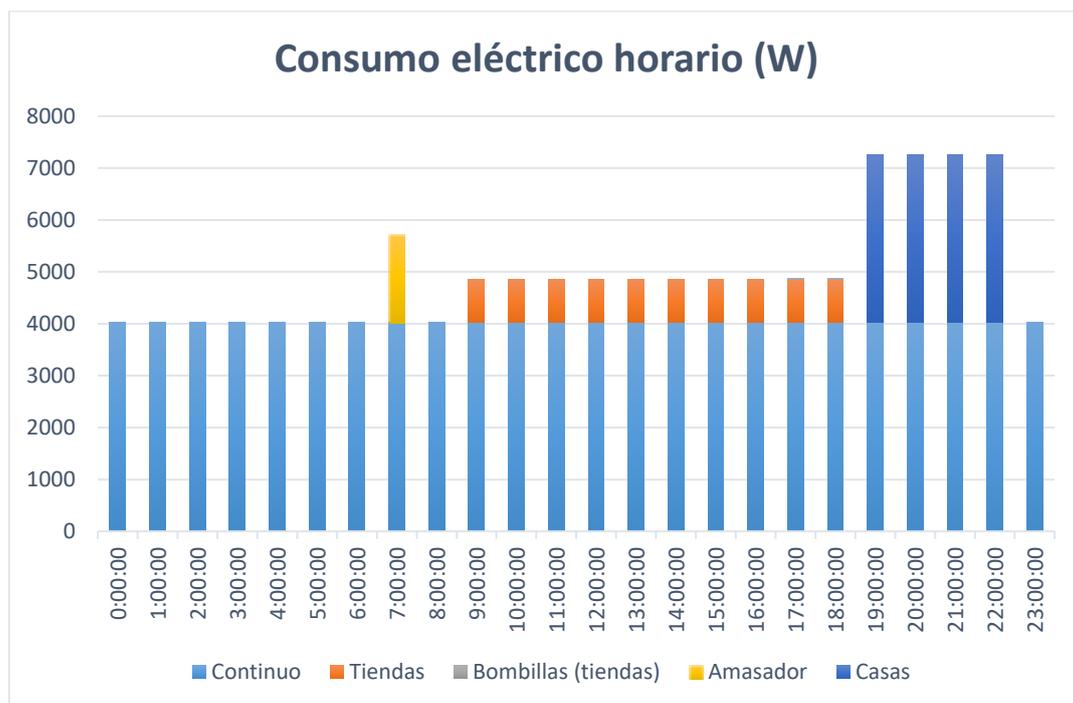


Figura 20: Consumo eléctrico horario en un día en Nikki. FUENTE: Elaboración propia

Otro método posible para realizar el cálculo de energía eléctrica consumida es a través de la factura de la luz. A continuación se presentan las tarifas de la SBEE, el único proveedor. Hay tres tipos de modalidades, para uso doméstico, uso profesional (tiendas, restaurantes, cafeterías y hoteles entre otros) o uso público. Cada una presenta una forma diferente de calcular los consumos, es decir, no hay un precio fijo de la electricidad, además habría que tener en cuenta el impuesto TVA que es desconocido.

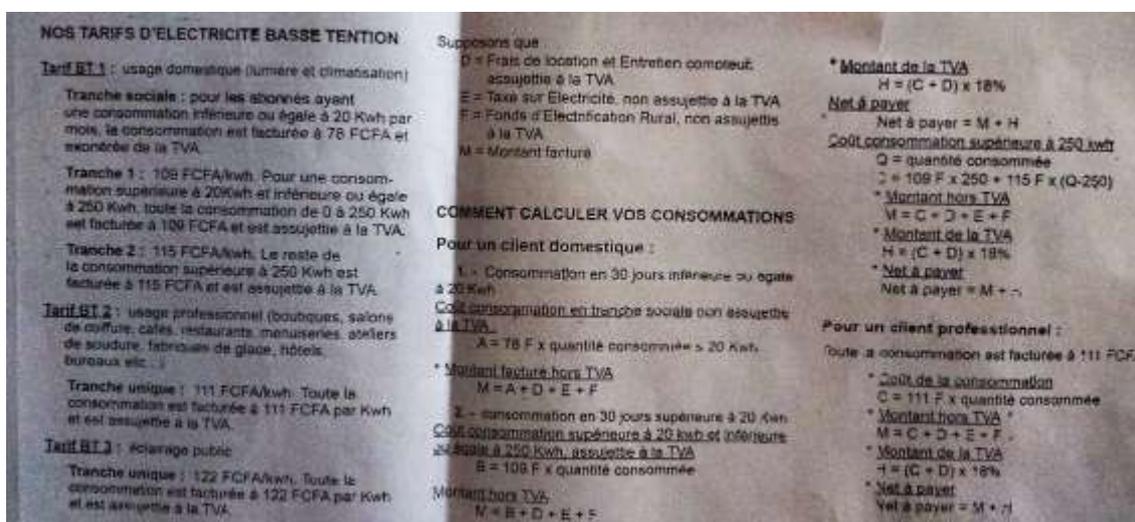


Figura 21: Tarifas de electricidad en Benín. FUENTE: OAN Internacional

A pesar de estos inconvenientes, se ha realizado una aproximación de los kWh/mes por cada casa obteniendo unos valores muy próximos al método utilizado anteriormente. El problema existente en este método es la incapacidad para mostrar el consumo horario de cada casa, ya que los datos de partida eran el gasto de CFA/mes. Por ello solo ha sido utilizado como límite superior de cada casa o tienda y así mejorar el cálculo de horas de funcionamiento de cada aparato eléctrico.

	Nº de personas	Consumo máx al mes (kWh)
Casa 1 (Gahmarou)	1	20
T-1 papelería (Gahmarou)	N/A	86
Casa 2 (Gahmarou)	3	81
Mezquita (Gahmarou)	N/A	106
Casa 3 (Gahmarou)	7	253
T-2 MTN (Gahmarou)	N/A	Todavía no ha pagado factura
T-3 Panadería (Gahmarou)	N/A	454
T-4 Supermercado (Gahmarou)	N/A	1066
Casa 4 (Gahmarou)	5	55
Casa 5 (Gahmarou)	20	230
Casa 6 (Gahmarou)	N/S	No hay datos
Casa 1 (Gourou)	10	35
Casa 2 (Gourou)	7	240
Casa 3 (Gourou)	10	27
Casa 4 (Gourou)	8	51
Casa 5 (Gourou)	10	90

Tabla 4: Consumo por casa o tienda en Nikki. FUENTE: Elaboración propia



## Capítulo 4: Alternativas planteadas

Hoy en día, las tecnologías energéticas avanzan significativamente. Para poder proponer buenas alternativas, capaces de suplir la demanda exigida y que se ajusten a la evolución del mercado mundial, se apuesta por alternativas renovables. Por ejemplo, en España el 40% de la electricidad en 2017 consumida proviene de energías limpias. [23]. En el siguiente gráfico se muestra la gran evolución de utilización de las energías renovables hasta 2014, lo que quiere decir que en solo 3 años ha incrementado un 20% su uso con fin eléctrico.

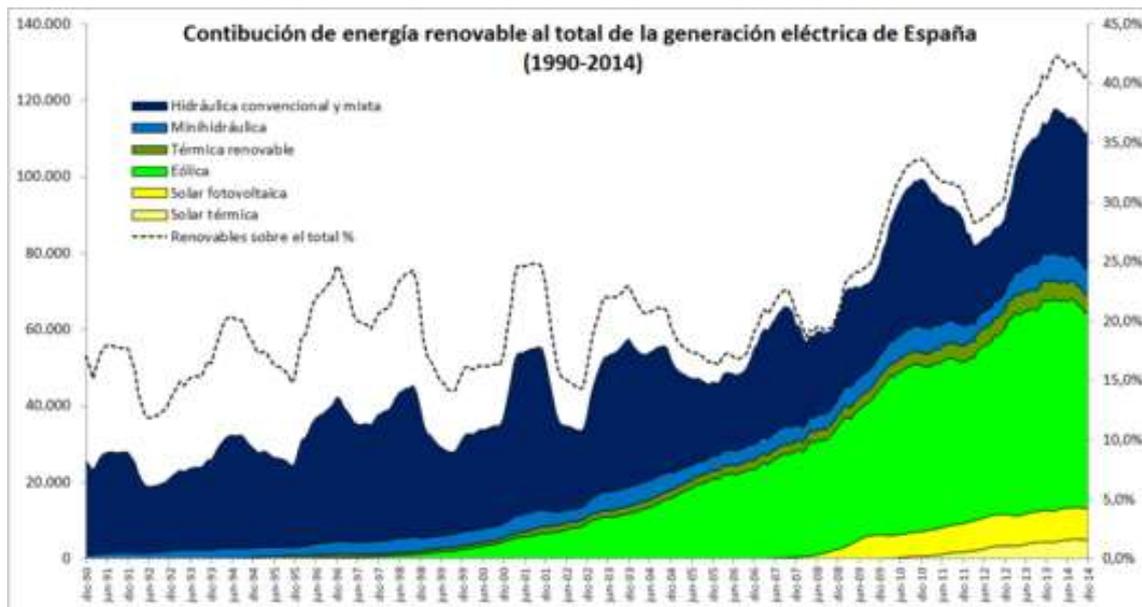


Figura 22: Energía renovable para electricidad en España. FUENTE: [24]

Es importante, antes de afrontar la decisión de suplir la demanda existe con una u otra opción de tecnología energética, realizar una comparación entre ellas. Habrá que valorar tanto las que emplean combustibles fósiles como las energías renovables. Esta comparación se realizará mediante un modelo de factores para su posterior ordenación en un ranking.

### 4.1 Tecnologías energéticas posibles

#### 4.1.1 Hidráulica

La disponibilidad de agua en la región de Nikki es muy limitada. Poseen en total seis bombas en todo el territorio para dar cobertura a los pozos. Entre las cuales hay dos cerradas por la escasez de agua y el resto o están cerradas por otros factores o funcionan con pérdidas

importantes. Por estos motivos, existe un importante déficit en cuanto a cobertura, mantenimiento, continuidad y calidad del agua.

La energía hidráulica se basa en el uso de la energía potencial y cinética del agua que al pasar a través de una turbina, trasmite un movimiento de rotación y produce energía eléctrica gracias a los generadores. El emplazamiento de Nikki no se encuentra cerca del cauce de ningún lago o río, requisito imprescindible para generar energía eléctrica. Por ello, el potencial de generación es muy bajo frente a otros lugares de África Ecuatorial donde los ríos son permanentes y además los poblados se sitúan próximos a ellos.

En contraposición, la tecnología utilizada está muy desarrollada y puede ser considerada una de las fuentes renovables más competitivas del mercado. En consecuencia, desde un punto de vista económico, sería una buena opción además de eficaz ya que sería una pequeña central hidroeléctrica con una inversión inicial inferior a otras fuentes de energía renovable.

### 4.1.2 Eólica

La energía eólica procede de la energía cinética de una masa de aire en movimiento. Al incidir sobre las palas de los aerogeneradores produce un movimiento de rotación que se transmite al generador produciendo electricidad. Tal y como se mostró en el capítulo anterior, el viento en Nikki es regular pero muy bajo, de un orden de 2 m/s. Debido a esto, el factor de capacidad (cociente entre la energía obtenida con respecto a la ideal que se obtendría si funcionará continuamente) también es muy bajo, afectando así al rendimiento de la máquina. En cambio, en países del norte de África como Túnez, Egipto y Marruecos, se han desarrollado centrales eólicas donde tienen un gran potencial de generación, así como en el sur del continente africano.

En cuanto a la viabilidad económica del proyecto, dependerá del tamaño de la instalación. En Nikki se trataría de una central aislada pequeña y por tanto, la inversión no es muy costosa, utilizando diseños muy sencillos y con el menor número de componentes posibles; por otra parte el ruido generado sería mínimo. Pero al depender de un recurso tan variable como es el viento y no poder garantizar la presencia de este continuamente, no es una opción viable.

### 4.1.3 Solar

África recibe el promedio mayor de radiación solar del mundo durante el año. En algunas partes del continente, cerca del Cinturón del Sol, un panel fotovoltaico podría producir el doble de energía que uno situado en Europa. Este tipo de energía aprovecha la radiación solar, que a través de una célula fotovoltaica, genera energía eléctrica. Es una de las energías renovables más novedosas del mercado, pero en los últimos años ha experimentado una evolución trascendental tanto en reducción de costes como en aumento de fiabilidad. El Sol es un reactor nuclear seguro, limpio, inagotable y barato. Uno de los aspectos a tener en cuenta fundamentales de este recurso es la baja fluctuación mensual en la energía recibida por el Sol en Nikki, como ya se citó anteriormente. Esto supone una clara ventaja a la hora de diseñar y gestionar cualquier tipo de instalación fotovoltaica. Además es una tecnología modular que se adapta al crecimiento poblacional, al tratarse de dos pueblos en proceso de desarrollo es altamente probable que la población crezca y que pueblos cercanos quieran conectarse también.

Los inconvenientes principales de este tipo de tecnología es la inversión inicial siendo una de las más altas entre las energías renovables y la dependencia de la radiación solar para garantizar un suministro continuo. Por ello, es necesario complementar este tipo de tecnología con otra gestionable ya sea con baterías, combustibles fósiles, etc.

A continuación se presentan dos tipos de sistemas híbridos:

- Fotovoltaico-Diésel: en este tipo de tecnología se utiliza un generador diésel para conseguir un suministro continuo y estable. Se minimiza el uso de estos generadores utilizando el recurso solar cuando esté disponible. La desventaja de este sistema es la dependencia con otros países del abastecimiento del combustible y las fluctuaciones de sus precios. Además es una energía muy contaminante, ya que los generadores diésel emiten, entre otras cosas, CO<sub>2</sub> culpable del efecto invernadero.
- Fotovoltaico- Baterías: este tipo de sistemas almacenan en baterías la energía sobrante en momentos pico del día. De esta manera, no sería necesario implantar otro tipo de tecnología que supla la falta de radiación solar. Las grandes ventajas de este sistema son que es una tecnología infinita, limpia, proporciona autonomía energética evitando la dependencia con otros países, la sencillez y la modularidad.

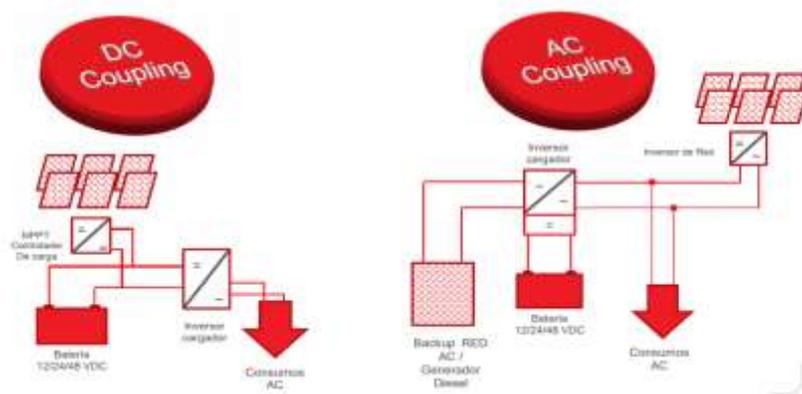


Figura 23: Comparación entre hibridación FV-diésel y FV-baterías. FUENTE: [25]

## 4.2 Índice de factores a considerar

Para poder evaluar qué alternativa es más eficiente y establecer un ranking con ellas, se va a aplicar un método cuantitativo, el método de los factores ponderados. Para ello, en primer lugar es necesario establecer los factores relevantes para la selección del tipo de tecnología a implantar en Nikki:

- Inversión inicial
- Coste de operación
- Sostenibilidad con el medioambiente
- Facilidad de mantenimiento
- Potencia suministrada

En segundo lugar hay que asignar un peso característico a cada factor que muestre la importancia relativa que tiene en la toma de la decisión. En los pesos mostrados a continuación se ha tenido en cuenta el enfoque de la central, es decir, una pequeña instalación aislada en el norte de Benín. Todos los pesos han sido tomados por criterio personal después de haber valorado que era lo más importante en una instalación de generación de electricidad en Nikki.

- Inversión inicial 20%
- Coste de operación 20%
- Sostenibilidad con el medioambiente 25%
- Facilidad de mantenimiento 30%
- Potencia suministrada 5%

Los factores más significativos son la facilidad de mantenimiento y la sostenibilidad medioambiental. Esto se debe a que si es una instalación con una dependencia continua de personal para el mantenimiento y revisión de la planta, se convierte en una opción muy limitante al estar situada en Benín. La sostenibilidad es muy relevante debido a las subvenciones, ya que existen ayudas del Gobierno de Benín que apuestan con este tipo de instalaciones responsables que aprovechan los recursos renovables existentes en el país, evitando así cualquier tipo de dependencia de otros. Seguido de estos dos factores aparece la inversión inicial y el coste de operación. La inversión inicial no tiene tanto peso como los anteriores al ser una instalación pequeña cuyo precio nunca será desorbitado si se realiza un buen dimensionamiento, también es importante considerar el coste de transporte de los dispositivos. El coste de operación está relacionado con el consumo de combustible fundamentalmente, es vital tenerlo en cuenta porque se puede disparar el precio de la energía eléctrica suministrada a causa de la dependencia con otros países y con las fluctuaciones en el precio de combustible. Por último, encontramos la potencia suministrada, este factor recibe menos peso puesto que Nikki no es una ciudad que demande demasiada potencia ya que sus recursos y dispositivos electrónicos son limitados.

Tras haber descrito los pesos de cada factor, es necesario evaluar con puntuaciones del 1 al 10 cada factor de cada alternativa propuesta. El 1 otorga la calificación peor o menos favorable y el 10 el mejor; por ejemplo, una alternativa con una inversión inicial muy elevada tendrá una puntuación más baja que una que tenga una inversión inicial menor.

La puntuación total de cada alternativa ( $P_{total1}, P_{total2}, \dots, P_{totalm}$ ) se obtiene tras realizar la suma de las puntuaciones de cada factor ( $f_1, f_2, \dots, f_n$ ) ponderadas ( $p_1, p_2, \dots, p_n$ ) de acuerdo al grado de relevancia, donde  $n$  es el número de factores y  $m$  el número de alternativas propuestas. Un ejemplo para calcular la puntuación total de la primera alternativa sería:

$$P_{total1} = f_1 * \frac{p_1}{100} + f_2 * \frac{p_2}{100} + f_3 * \frac{p_3}{100} + f_4 * \frac{p_4}{100} + f_5 * \frac{p_5}{100} + f_6 * \frac{p_6}{100}$$

A continuación se muestra la tabla con las puntuaciones finales:

Factores	Peso (%)	Hidráulica	Eólica	FV-Diésel	FV-Baterías
Inversión inicial	20	5	5	4	4
Coste de operación	20	1	6	2	9
Sostenibilidad con el medioambiente	25	7	9	5	9
Facilidad de mantenimiento	30	7	7	8	8
Potencia suministrada	5	6	5	10	10
	<b>Puntuación total</b>	5,35	6,8	5,35	7,75

Tabla 5: Modelo de factores ponderados. FUENTE: Elaboración propia

La fuente hidráulica junto con la opción de hibridación de células fotovoltaicas con diésel han obtenido las peores puntuaciones, seguidas de la eólica; y en primer lugar se encuentra la tecnología de FV con baterías. La tecnología hidráulica junto con la eólica presentan una inversión inicial menor que cualquiera relacionada con paneles solares, pero los valores son tan próximos (4 y 5) debido a la especial construcción a realizar orientada a la obtención máxima de potencia de dichas tecnologías en África.

A la hora de evaluar el coste de operación, cabe destacar que al carecer Nikki de ríos o importantes acumulaciones de agua, el coste de operación hidráulica debido al transporte de agua, se dispara. Algo parecido ocurre con la necesidad de combustible diésel cuya proveniencia es de países vecinos, que supone una alta dependencia exterior para el correcto funcionamiento de la central y una fluctuación imprevisible de los precios.

En cuanto a la sostenibilidad con el medioambiente, sin duda, la peor opción es el uso de combustible diésel debido a que el resto son fuentes renovables de energía. El uso de este tipo de combustible favorece los gases de efecto invernadero y supone un obstáculo para el impulso de las renovables. Las fuentes solares y eólicas son consideradas como las mejores alternativas, y ligeramente peor puntuada está la hidráulica por el impacto ambiental debido a la construcción de presas o embalses.

Respecto a la facilidad de mantenimiento, las cuatro tecnologías han obtenido una puntuación bastante alta, en Nikki no se buscan instalaciones muy complejas, sino de larga vida útil y sin apenas necesidad de mantenimiento.

Para finalizar, el factor relacionado con la potencia suministrada hace referencia a la facilidad de alcanzar la potencia requerida por la población. Al no existir apenas recursos de viento y agua, difícilmente alcanzarán estas tecnologías el nivel de potencia necesario, en contraposición del recurso solar con el que sí se puede.

De esta forma y valorando todo los puntos citados anteriormente, se decide realizar una instalación solar fotovoltaica con baterías. La inversión inicial de este tipo de tecnología ha ido decayendo a lo largo de los años (un 67% entre 2010 y 2015), lo que resulta una clara ventaja, además del diseño modular y su alta fiabilidad.



## Capítulo 5: Componentes en una instalación solar fotovoltaica

### 5.1 Funcionamiento de una instalación solar FV

La energía solar fotovoltaica, como se ha mencionado anteriormente, permite la obtención de electricidad gracias al Sol como fuente de energía.

La radiación solar, que está formada por fotones, incide sobre una célula fotovoltaica (material semiconductor dopado) generando una transferencia de energía entre dicho fotón y el electrón, que es arrancado del átomo. Este efecto se denomina efecto fotoeléctrico y es la base fundamental para la generación de energía fotovoltaica.

El material utilizado para las células se consigue tras el dopaje, es decir, agregando impurezas para mejorar la conductividad eléctrica de un material puro. Es necesario combinar dos capas, de tipo n y tipo p de un semiconductor. El semiconductor más utilizado debido a su efectividad es el silicio pero también existen otros tipos, véase la siguiente figura.

		VIII A							
		III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A		
		5	6	7	8	9	10		
		B	C	N	O	F	Ne		
		10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.183		
		13	14	15	16	17	18		
		Al	Si	P	S	Cl	Ar		
		26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	39.948		
IB	IIB			31	32	33	34	35	36
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
63.54	65.37	69.72	72.59	74.922	78.96	79.909	83.80		
47	48	49	50	51	52	53	54		
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
107.870	112.40	114.82	118.69	121.75	127.60	126.904	131.30		
79	80	81	82	83	84	85	86		
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
196.967	200.59	204.37	207.19	208.980	(210)	(210)	(222)		

Figura 24: Tipos de semiconductores en naranja. FUENTE: Curso de Fuentes de Energía, ETSII

La capa tipo n del silicio tiene insertados átomos de impurezas que “donan” sus electrones, suelen ser elementos del grupo V como el fósforo que tienen un número mayor de electrones que el actual elemento. El resultado de esta inserción es una capa eléctricamente neutra, ya que los átomos insertados en la red cristalina representan un número muy pequeño (1/1000000) con respecto a los átomos puros, pero cuyo número de electrones es superior al que tenía anteriormente. De esta manera, se conoce también como capa n o negativa.

La capa tipo p, por el contrario, recibe la inclusión de átomos con menos electrones que el átomo original, en caso del Si se insertan átomos de boro o aluminio (grupo III). El resultado es una capa eléctricamente neutra, por la misma razón que la capa n, pero en este caso con un

número menor de electrones que se representa mediante “huecos” entre los diferentes átomos, denominados positivos. Por ello, la capa se conoce como p o positiva.

Una vez establecidas las capas se procede a la unión de estas, la superficie n queda cargada positivamente debido a que los electrones sueltos existentes en esta capa fluyen hacia la capa p, que queda cargada negativamente, como resultado se genera un campo eléctrico. La región de unión de estas supone una barrera de potencial, que recibe el nombre de región de agotamiento. A demás, se colocan dos terminales eléctricos en cada superficie de las capas conectadas a una carga externa.

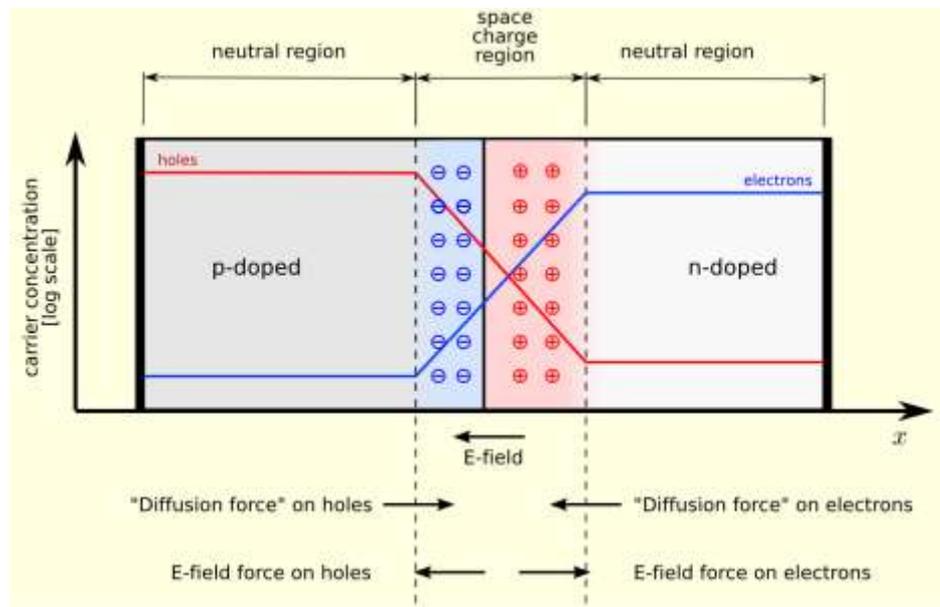


Figura 25: Conducción en una unión NP. FUENTE: [26]

Así pues, una vez que incidan los fotones de los rayos solares sobre la capa n (capa iluminada), comunican su energía a los electrones y rompen los enlaces hueco-electrón. Algunos de los electrones, forzados por la barrera de potencial, se conducirán por el circuito exterior antes de poder recombinarse con un hueco (par hueco-electrón), creando así un trabajo útil en forma de corriente eléctrica.

Si se estudia con algo más de detalle, se puede representar el funcionamiento de una célula mediante un circuito eléctrico. La unión de las capas p-n equivale a un diodo, donde la corriente eléctrica circula de p (capa oscura) hacia n (capa iluminada), producida por la diferencia de voltaje en los terminales que induce la recombinación par hueco-electrón. Esta corriente se denomina corriente de oscuridad ( $I_D$ ). La fotocorriente ( $I_L$ ) es generada por la dificultad de recombinación de portadores, debido a que el campo eléctrico, producido por la iluminación de la unión p-n, los conduce.

La corriente resultante de estas dos es la corriente final entregada a la carga, una ecuación propia de las células fotovoltaicas:

$$I = I_L - I_D$$

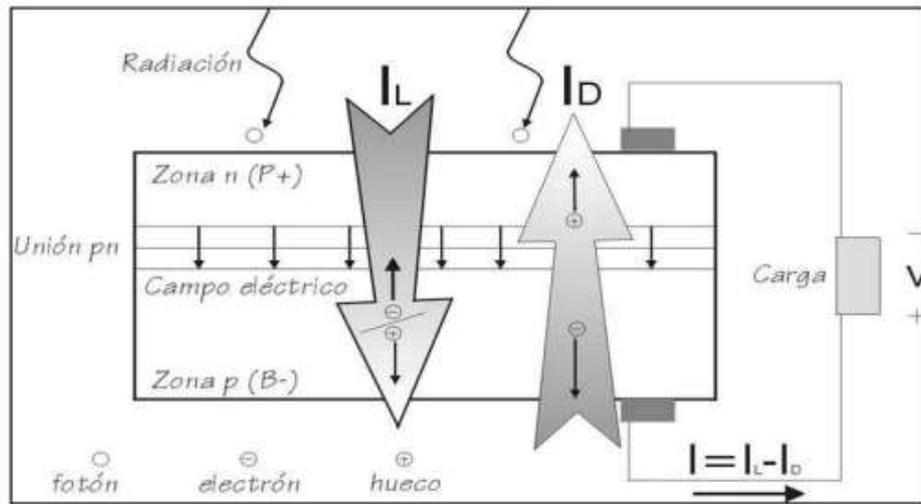


Figura 26: Circuito eléctrico representativo de una célula FV. FUENTE: [26]

Para representar el circuito eléctrico desde un punto de vista real, aparecen una serie de resistencias:

- En relación con la resistencia de los contactos de los terminales eléctricos sobre la superficie de la célula ( $R_s$ )
- En relación con las corrientes de fugas por defectos del material o fronteras de grano y en la superficie y bordes del diodo ( $R_p$ )

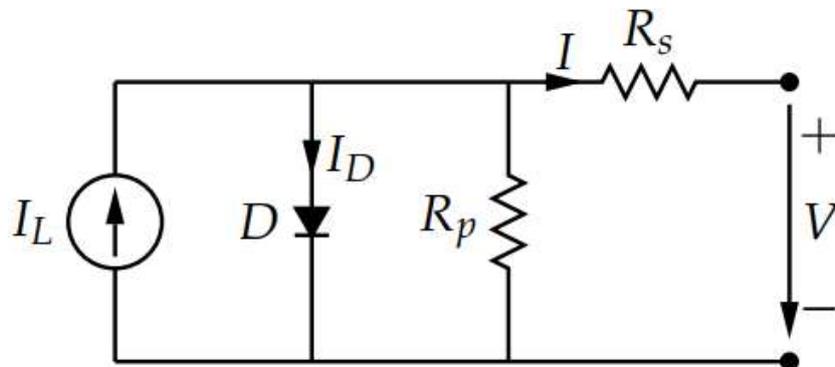


Figura 27: Circuito equivalente de una célula. FUENTE: [26]

## 5.2 Panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos son la parte de la instalación más importante, donde se encuentran conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre un soporte o marco las células que transforman la energía de los fotones del Sol en eléctrica. La agrupación de las células en estos paneles tiene como fin la obtención de un intensidad de corriente y un voltaje suficientemente elevados como para cargar baterías, suministrar energía a un hogar (pasando primero por el inversor que transforme DC en AC) u otro tipo de aplicaciones tanto domésticas como industriales.

Existen tres tipos fundamentales de paneles fotovoltaicos que se explicarán brevemente:

- Panel solar monocristalino: se realiza con silicio dopado con boro pero altamente cristalizado. Son los paneles con mayores valores de eficiencia y con la vida útil más larga pero son los más caros. Además, si hay alguna sombra o suciedad sobre los paneles, el circuito puede estropearse y el proceso de fabricación derrocha gran cantidad de silicio.
- Panel solar policristalino: al igual que el monocristalino utiliza silicio dopado pero con menos fases de cristalización lo que da lugar a un proceso más barato. Por el contrario, la resistencia al calor y por consiguiente, la vida útil es menor que en el anterior. De igual manera ocurre con el rendimiento, que supone un uso de superficie mayor para generar la misma electricidad de los paneles anteriores.
- Panel solar amorfo o de lámina delgada: están formados por una capa fina de distintos materiales como por ejemplo el silicio amorfo, arseniuro de galio o cadmio, diseleniuro de cobre o indio con un espesor de  $1\mu\text{m}$  cada material y una capa de  $10\text{-}50\mu\text{m}$  de silicio cristalino (valores de espesores aproximados). Las principales ventajas de estos paneles, que cada vez son más demandados en el uso doméstico, son: bajo coste, flexibilidad del panel y, por tanto, capacidad de adaptación en superficies y que el rendimiento no se ve afectado por otros agentes que no sean la irradiación solar. Por otro lado las desventajas existentes son la degradación rápida y la necesidad de ocupar mayor espacio (casi 4 veces más que monocristalinos) para generar la misma cantidad de energía.

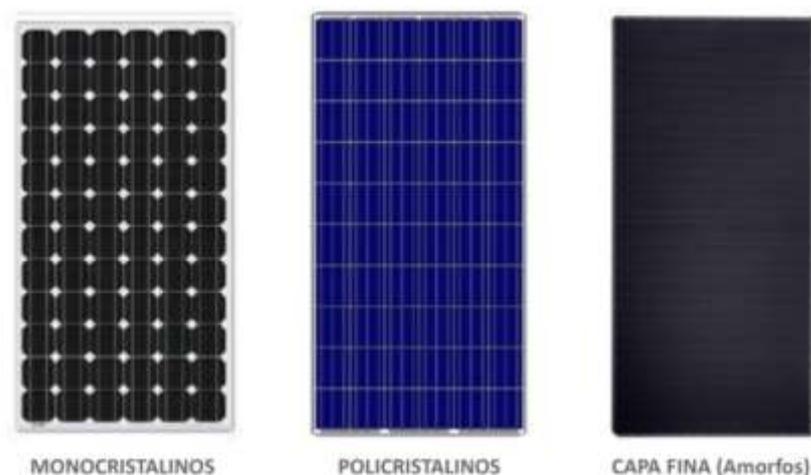


Figura 28: Tipos de paneles fotovoltaicos. FUENTE: [27]

Una vez identificados los tipos de paneles solares, es necesario determinar la forma de conexión de las células entre sí para dar lugar a dichos paneles. Las células pueden estar conectadas en

serie, en paralelo o en serie-paralelo, de acuerdo con la posterior aplicación que se quiera realizar para asegurar una tensión y rendimiento adecuados.

La conexión en serie de las células se consigue conectando cada célula directamente con la siguiente, esto es, el polo positivo de una con el polo negativo de la siguiente. Así pues, se mantiene la intensidad de cada célula igual en cada una y el voltaje se suma.

$$I_{Total} = I_{Cel1} = I_{Cel2} = \dots = I_{CelN}$$

$$V_{Total} = V_{Cel1} + V_{Cel2} + \dots + V_{CelN}$$

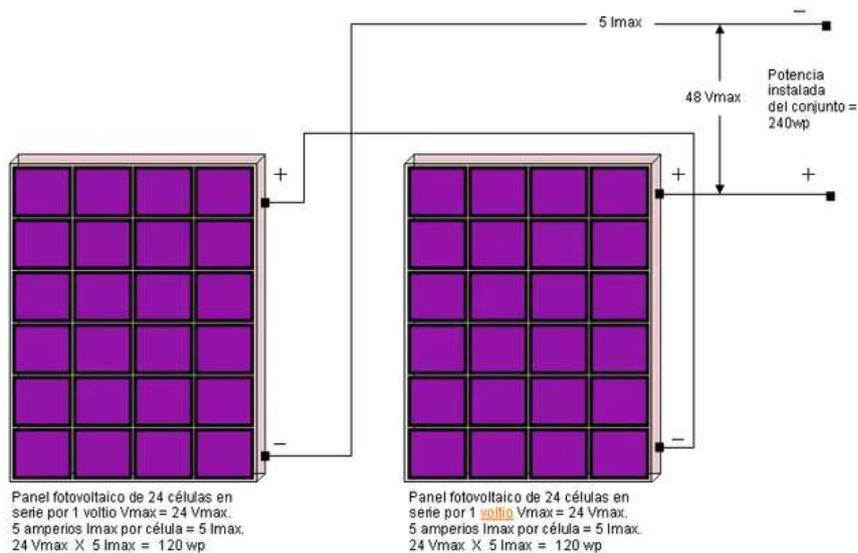


Figura 29: Ejemplo práctico de conexión en serie. FUENTE: [28]

La conexión en paralelo de las células se realiza asociando los polos negativos de cada célula y por otro lado los polos positivos. De esta manera, se consigue un voltaje constante e igual en cada célula y las intensidades se suman.

$$I_{Total} = I_{Cel1} + I_{Cel2} + \dots + I_{CelN}$$

$$V_{Total} = V_{Cel1} = V_{Cel2} = \dots = V_{CelN}$$

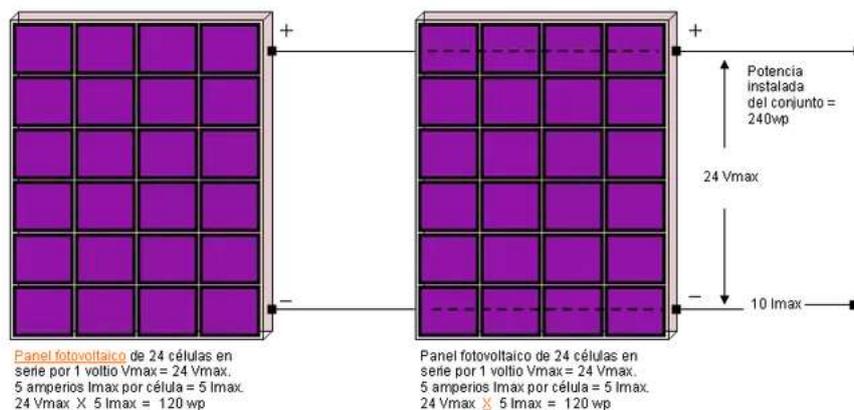


Figura 30: Ejemplo práctico de conexión en paralelo. FUENTE: [28]

## Componentes de una instalación solar fotovoltaica

La conexión mixta se realiza conectando previamente unos grupos de células en serie para después conectar dichos grupos en paralelo. Gracias a esta disposición se consigue aumentar tanto el voltaje como la intensidad.

$$V_{Total} = V_{Cel(módulo)} * N^{\circ} \text{ de células}$$

$$I_{Total} = I_{Cel(módulo)} * N^{\circ} \text{ de células}$$

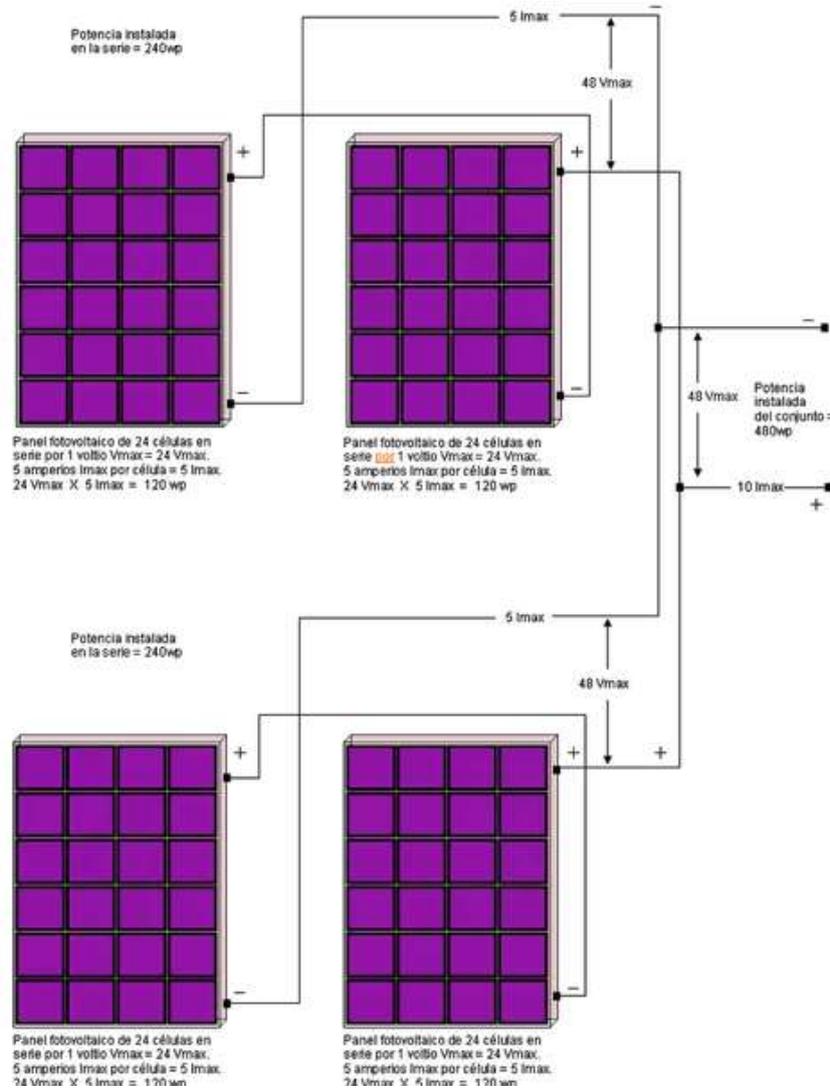


Figura 31: Ejemplo práctico de conexión mixta. FUENTE: [28]

Una vez definidas las diferentes modalidades de unión de las células, se presenta un esquema de su construcción con las diversas capas que se pueden encontrar para su protección y seguridad. La capa exterior es una cubierta de vidrio para proteger de los fenómenos atmosféricos al panel pero dejando pasar la radiación solar. Seguido de esto encontramos el encapsulado (generalmente de EVA) que protege al módulo de la humedad, abrasión, rayos UV y de posibles vibraciones. Luego encontramos la protección posterior que protege frente a fenómenos atmosféricos y da rigidez. El marco metálico que otorga rigidez y estanqueidad al conjunto de células, el diodo de protección contra posibles fallos en el funcionamiento del sistema como sobrecargas o puntos calientes y las cajas estancas donde se encuentra el cableado y las bornas de conexión.



Figura 32: Elementos de un panel fotovoltaico. FUENTE: [29]

### 5.2.1 Parámetros de un panel fotovoltaico

Para poder determinar el funcionamiento de un panel fotovoltaico en su totalidad es necesario conocer una serie de parámetros que lo identifiquen. Los paneles fotovoltaicos reciben la radiación solar y generan una corriente y un voltaje con unos valores dependientes de la temperatura, irradiación y del punto de trabajo impuesto por la carga. A continuación se presenta una gráfica, conocida como curva característica o curva I-V, con los puntos más significativos de funcionamiento de un panel que serán los parámetros más importantes. Para poder realizar esta curva con datos específicos es necesario determinar las condiciones del ensayo, es decir, las condiciones estándar de medida y de operación.

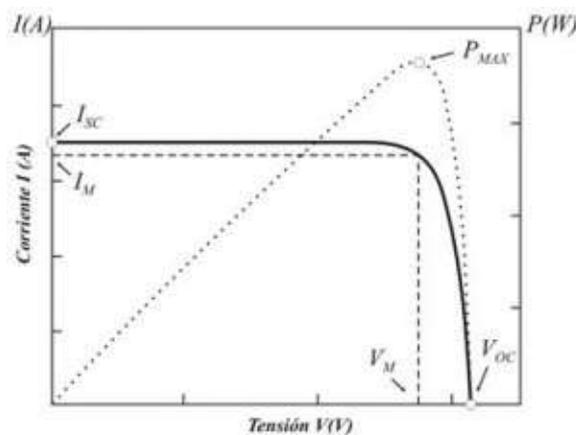


Figura 33: Curva característica de una célula FV. FUENTE: [30]

Por consiguiente los parámetros más importantes de una célula solar son:

- Corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ): es la corriente máxima que puede obtener la célula fotovoltaica y se produce cuando el voltaje es cero, es decir, las terminales eléctricas están conectadas directamente. Es un parámetro sencillo de medir y es de vital importancia cuando se construye la protección del sistema FV.

$$I_{SC} = I (V = 0) = I_L$$

## Componentes de una instalación solar fotovoltaica

- Tensión en vacío ( $V_{OC}$ ): es el voltaje máximo que puede generar la célula fotovoltaica por autopolarización y se produce en circuito abierto, es decir, corriente nula. Este parámetro también es muy sencillo de obtener y es de vital importancia cuando se construyen paneles fotovoltaicos en serie (conectados a un inversor central).

$$V_{OC} = \frac{mkT}{e} \ln \left[ \frac{I_L + I_0}{I_0} \right]$$

- Factor de forma (FF): representa la calidad de la célula, se calcula como el cociente entre la potencia máxima que puede generar la célula para entregarla a una carga y el producto de la tensión de circuito abierto ( $V_{OC}$ ) con la intensidad de cortocircuito ( $I_{SC}$ ). El valor es característico de cada célula pero se encuentra en un rango de 0,7-0,8 (el valor ideal es la unidad) para semiconductores cristalinos, entre ellos, el silicio.

$$FF = \frac{I_M * V_M}{I_{SC} * V_{OC}}$$

- Potencia máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ): es el punto de nivel óptimo de operación de la célula.

$$P_{m\acute{a}x} = FF * I_{SC} * V_{OC}$$

- Rendimiento o eficiencia ( $\eta$ ): relación entre la irradiación que recibe la célula y su capacidad para convertirla en energía eléctrica. Siendo S la superficie de la célula y G la irradiancia recibida ( $kW/m^2$ )

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{S * G}$$

A continuación se muestra una imagen que representa la evolución de la eficiencia de las células fotovoltaicas en las últimas décadas y como se han desarrollado mejores opciones que aumentan este valor significativamente.

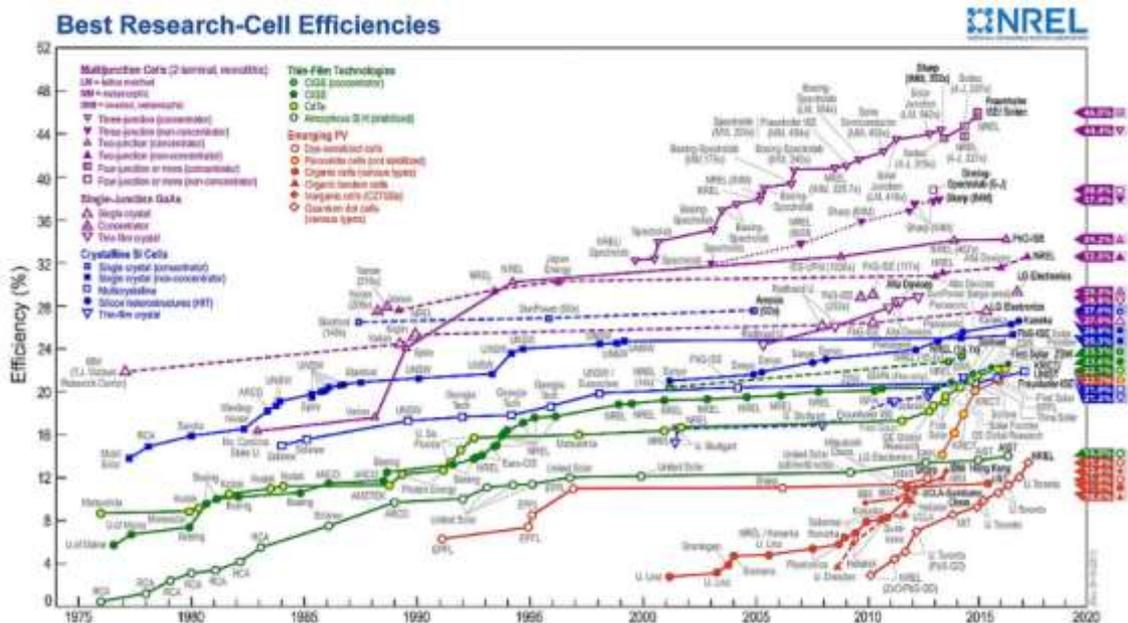


Figura 34: Valores de eficiencias (%) de las células FV. FUENTE: [31]

Para poder establecer esta serie de parámetros, es necesario trabajar en las condiciones estándar (STC), de uso universal, según la norma UNE-EN61215. [32]

- a. Irradiación: 1000 W/m<sup>2</sup>
- b. Masa de aire: AM 1,5 G
- c. Temperatura de las células: 25 °C
- d. Incidencia normal sobre el panel

Por último, otro parámetro significativo es la TONC o Temperatura de Operación Nominal de la Célula, para determinarlo hay que trabajar también con una serie de condiciones de operación definidas, que son:

- a. Irradiación: 800 W/m<sup>2</sup>
- b. Masa de aire: AM 1,5 G
- c. Temperatura ambiente: 20 °C
- d. Velocidad del viento: 1 m/s
- e. Incidencia normal sobre el panel

Una vez definidos los parámetros característicos de la célula fotovoltaica, resulta interesante realizar un estudio de cómo afectan algunos factores al rendimiento de dicha célula. El efecto de la temperatura influye en el voltaje máximo ( $V_{OC}$ ), donde la corriente se considera prácticamente constante. A temperaturas más altas, la tensión en el circuito abierto disminuye aproximadamente en un orden de 2,3 mV/°C en el caso del silicio, lo que implica una menor generación de energía. Otro agente influyente en el rendimiento es la irradiancia, que afecta a la corriente de iluminación ( $I_L$ ), el voltaje en este caso se considera constante. Esta intensidad y la irradiancia son directamente proporcionales, de manera que cuando la irradiación del Sol disminuye, la intensidad también lo hace y por consiguiente, la potencia producida de salida. A demás de estos dos factores, el rendimiento se puede ver afectado por sombras, motas de polvo depositadas, manchas, quemaduras del material, etc.

A continuación se presentan dos figuras que reflejan el cambio en la potencia máxima que se genera debido a los cambios en la temperatura y en la irradiancia.

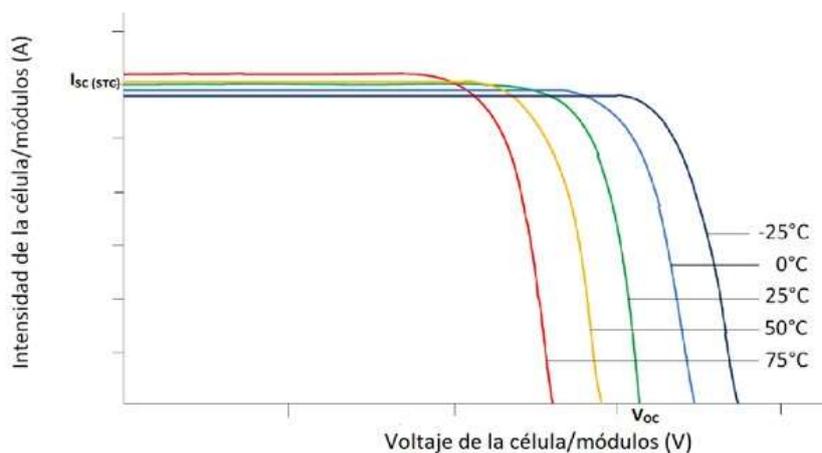


Figura 35: Curva IV con temperatura variable. FUENTE: [33]

Componentes de una instalación solar fotovoltaica

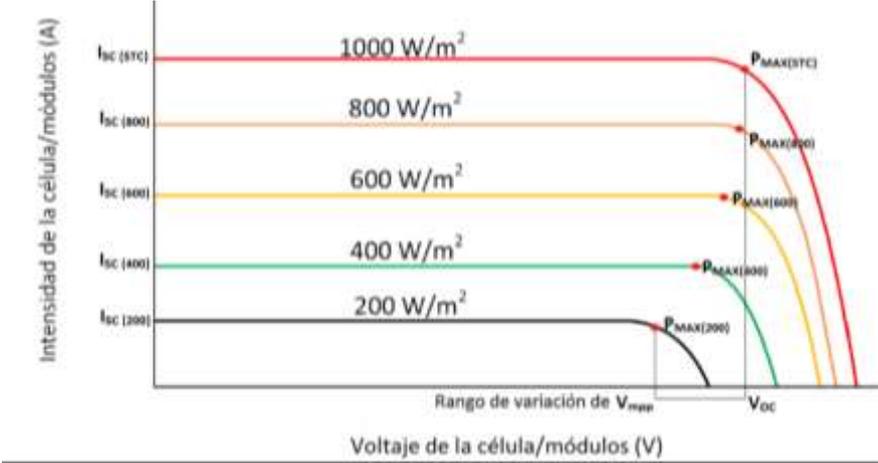


Figura 36: Curva IV con irradiación variable. FUENTE: [33]

## 5.3 Regulador

Este componente actúa como regulador de corriente que absorbe la batería y se coloca entre la conexión de los paneles con las baterías para evitar sobrecargas o sobredescargas en estas aumentando así su vida útil. Evita que la batería siga recibiendo energía cuando ésta ya está llena, lo que produciría un calentamiento o el inicio del proceso de gasificación. Esta sobrecarga se puede producir debido a que los paneles están dimensionados para hacer frente al peor mes, por lo que en meses de alta irradiación solar se puede llegar a duplicar la energía suministrada. A su vez, trabaja en sentido opuesto, es decir, evita que la batería se descargue por debajo de un nivel umbral ya que esto provocaría una disminución considerable en su capacidad de almacenamiento.

Es un elemento clave para todas las instalaciones, excepto si los paneles son autorregulables. Normalmente incorporan información sobre el nivel de carga de las baterías y se conectan en serie para poder desconectar el suministro de la batería frente a posibles problemas; esta desconexión se realiza mediante interruptores automáticos. Se evita la conexión en paralelo, excepto para pequeñas instalaciones fotovoltaicas, porque presentan una limitación en la corriente de trabajo. Los parámetros, en general, a controlar en un regulador son:

- Voltaje máximo admitido: es el voltaje que el regulador permite suministrar como máximo a la batería. El intervalo entre este valor y la tensión a la que pasa toda la corriente producida por los paneles se denomina intervalo de histéresis superior. Si este intervalo es muy pequeño, el regulador reconoce que está frente a una situación de sobrecarga y detiene el suministro.
- Voltaje de desconexión: es el voltaje al que se desconectan las cargas para evitar una sobredescarga de la batería. El intervalo de histéresis inferior es la diferencia entre este valor y el que permite la reconexión de nuevo a la carga.
- Intensidad máxima de carga: es la máxima corriente proveniente de los paneles que es capaz de admitir el regulador.
- Intensidad máxima de consumo: es el valor máximo de corriente que se puede disipar por el regulador.

A continuación se presentan los dos tipos fundamentales de reguladores de carga existentes, cuya diferencia radica en el rendimiento que consiguen obtener de los paneles solares:

Regulador PWM (puls with modulation): este tipo de regulador trabaja a la tensión de las baterías lo que obliga a los paneles a trabajar también con ese valor, es decir, por debajo del punto de potencia máximo. Raramente el rendimiento de estos supera el 80%, aunque se usan en muchas instalaciones debido a su bajo coste, tamaño y peso.

Regulador MPPT (Maximun Power Point Tracking): este tipo lleva incorporado un seguidor del punto de máxima potencia y un convertidor CC/CC, garantizando que los paneles puedan trabajar en ese punto independientemente de la tensión de la batería. Se consigue gracias a una conversión CC/CC, que permite modificar la corriente continua de más alta tensión en más baja para que se ajuste a los requisitos de las baterías en cada momento. Este regulador es más caro pero consigue unos rendimientos muy altos (95-98%), siendo recomendable para cualquier tipo de instalación menos en algún caso excepcional o instalaciones muy pequeñas.

## 5.4 Acumulador

El acumulador o batería es una parte esencial de la instalación fotovoltaica, se encarga de almacenar energía y poder suministrarla cuando la irradiación solar sea baja o nula. Se almacena en forma de energía química con reacciones reversibles. Dimensionar y seleccionar bien este elemento de la instalación es de una gran importancia ya que si la batería no es capaz de suministrar la energía demandada en periodos de irradiación nula, se cortará totalmente la electricidad. Por otro lado, si se dimensiona muy generosamente, es decir, con baterías de capacidades mucho mayores a la energía cedida por los paneles, los costes de compra e inversión inicial de la instalación se dispararán.

Hay una gran variedad de baterías en el mercado entre las que elegir, se diferencian por los electrolitos utilizados y la tecnología de fabricación, a continuación se presenta una tabla con los tipos y algunas características básicas:

Tipo de batería	Tensión por vaso (V)	Tiempo de recarga (h)	Autodescarga al mes	Nº de ciclos	Capacidad (tamaño)	Precio
Plomo-ácido	2	8 a 16	<5%	Medio	30-50 Wh/kg	Bajo
Ni-Cd	1,2	1	20%	Elevado	50-80 Wh/kg	Medio
Ni-Mh	1,2	2 a 4	20%	Medio	60-120 Wh/kg	Medio
Li ion	3,6	2 a 4	6%	Medio-bajo	110-160 Wh/kg	Alto

Tabla 6. Tipos de baterías. FUENTE: Elaboración propia

Las más utilizadas en instalaciones solares y en energías renovables son las baterías de Pb-ácido (un 90%) debido a que son las que mejor se adaptan a este tipo de requerimientos. Dentro de esta hay diversos modelos según sus funcionalidades, por ejemplo: tubular estacionaria, de arranque, de gel, solar, etc.

Cabe mencionar la nueva batería de ion-litio que se lanzó en 2015, la batería Tesla Powerwall. Fue creada por la organización Tesla Energy y funciona completamente con fuente solar. Presenta una capacidad de 13,5kWh y una eficiencia del 90% a ciclo completo. Requiere de un hardware que aún no está disponible en España para el autoconsumo e independencia de la red eléctrica. Actualmente su precio es muy elevado, entre unos 3500€, pero con la evolución del mercado y la creciente demanda de energía solar doméstica, será cada vez de más fácil acceso. [34]

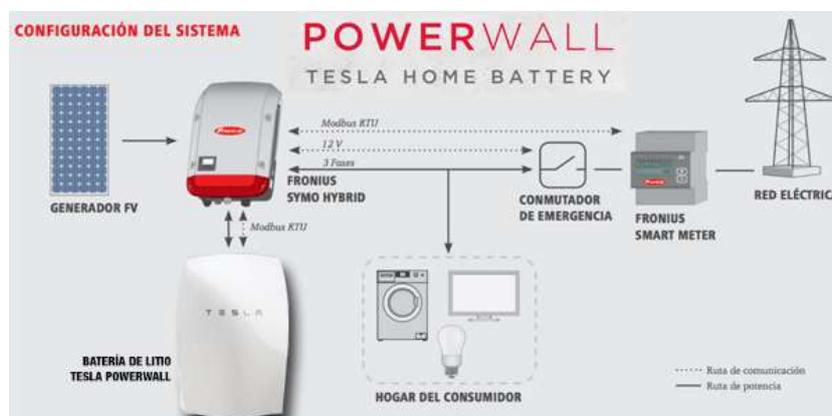


Figura 37: Ejemplo de funcionamiento de TeslaPowerwall. FUENTE: [34]

Independientemente de los modelos y tipos mencionados anteriormente, es necesario controlar algunos parámetros para garantizar un buen funcionamiento del acumulador.

- La temperatura: es menester realizar un estricto control sobre ella ya que a temperaturas elevadas, se reduce considerablemente la vida útil de una batería.
- Ambiente exterior: es importante que el acumulador se encuentre situado en un lugar bien ventilado y libre de llamas o chispas. Deben de colocarse desde o más arriba del nivel del suelo.
- Mantenimiento: un correcto mantenimiento es crítico para poder garantizar un buen funcionamiento. Algunas de las recomendaciones son: ajustar el nivel del electrolito como recomienda el fabricante siempre con agua destilada y cuidadosamente, recubrir con vaselina las bornas una vez conectadas, respetar la polaridad para evitar cualquier cortocircuito, recubrir las baterías, etc.
- Evitar el arranque de coches con baterías de uso fotovoltaico, es decir, cualquier proceso agresivo, de sobrecarga o de sobredescarga.

### 5.4.1 Parámetros del acumulador

Los parámetros eléctricos que hay que tener en cuenta para poder seleccionar la batería que mejor se adapte a los requisitos de la instalación solar son:

- Capacidad nominal (C): se define como la máxima cantidad de electricidad que puede obtenerse tras la descarga completa de una batería totalmente llena. Sus unidades son los Ah (amperios hora), de tal manera que si un acumulador tiene una capacidad de C150, puede transmitir una intensidad de 15A durante 10 horas o una de 1,5A en 100 horas. Esta relación no es exactamente lineal pero sirve para hacerse una idea del funcionamiento. Normalmente, en baterías solares los tiempos típicos de descarga son de orden de 100 horas, y para cálculos suele usarse C100. Cuando más tiempo tarda una batería en descargarse, aumenta su capacidad y si el tiempo de descarga es muy corto la disminuye.
- Tensión nominal (V): voltaje de trabajo del acumulador.
- Profundidad de descarga: hace referencia al porcentaje de la carga de la batería que se ha sacado cuando el acumulador estaba completamente cargado, se calcula como el cociente entre la energía que ha sido extraída entre su capacidad nominal. La profundidad de carga estándar de descarga de una batería está alrededor del 70%. El fabricante debe proporcionar gráficas informando sobre la relación entre el número de ciclos de la batería con la vida útil de la misma. Esto se debe a que varía durante la vida de una batería el número de ciclos de carga y descarga dependiendo de la profundidad de descarga.
- Eficiencia de la carga: hace referencia a la relación entre la energía utilizada para cargar la batería y la energía realmente almacenada, que puede suministrar más tarde la misma. Una eficiencia del 100% quiere decir que toda la energía que se absorbe de los paneles es la que será suministrada como energía eléctrica. Si este valor es muy bajo, será necesario aumentar el número de paneles solares para obtener los mismos resultados.

## Componentes de una instalación solar fotovoltaica

- Vida útil: es el número de ciclos que puede realizar una batería a una determinada profundidad de descarga y es directamente proporcional a la esta.

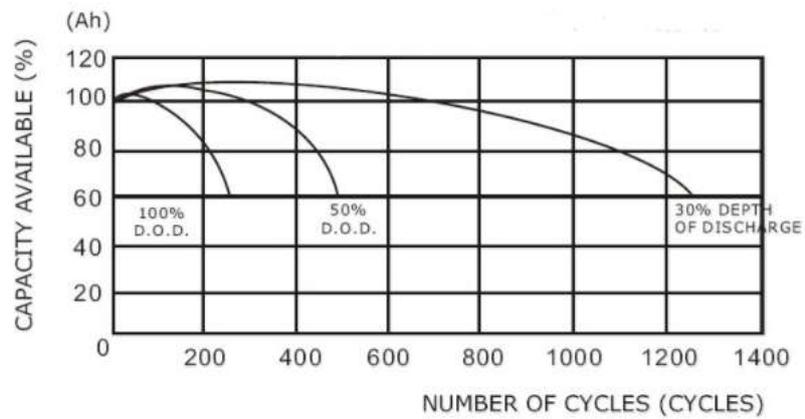


Figura 38: Relación entre la capacidad y la profundidad de carga. FUENTE: [35]

## 5.5 Inversor

Es el dispositivo que adecua la potencia DC que proporcionan los paneles solares con las condiciones de consumo. Es un elemento imprescindible en una instalación fotovoltaica y se utilizan generalmente dos tipos de convertidores:

- DC/DC: muchas veces la corriente continua generada por los paneles no coincide con la que requieren los dispositivos electrónicos, su función es hacerla coincidir para poder utilizarla.
- DC/AC: transforma la corriente continua en alterna, que es la corriente que consumen la mayor parte de los electrodomésticos. Hay una alta variedad de inversores en el mercado, desde más simples que generan ondas cuadradas hasta ondas senoidales que son mucho más sofisticados

Es vital tener en cuenta que la característica principal de un inversor es la tensión de entrada que debe coincidir con la del generador. De esta manera, se consigue alcanzar la máxima potencia y aumentar la eficiencia de esta, reduciendo las posibles pérdidas energéticas. La eficiencia se define como la relación entre la potencia entregada por el inversor para el consumo entre la que de entrada, la que se extrae de los paneles. Es importante saber que si la tensión continua de los paneles crece, la eficiencia también lo hará.

Las condiciones de trabajo y el uso de inversores variarán de manera significativa si la instalación es aislada o es en red. En red es necesario no solo que el inversor DC/DC haga coincidir las dos corrientes continuas, sino que el inversor DC/AC tenga que otorgar a la corriente alterna las mismas características de la red eléctrica. Aun así, es muy importante que en ambos tipos de instalaciones se respeten las exigencias de seguridad y protección: limitador de frecuencia máxima o mínima, de tensión máxima o mínima, protección contra sobrecarga, contra cortocircuito, dispositivos automáticos de corte, etc.

## 5.6 Esquema general

Independientemente del tipo y tamaño de la instalación, es necesario tener protecciones que protejan a la instalación y a las personas de cualquier fallo eléctrico. Existen equipos de protección en los paneles, en los inversores, a la salida del inversor, de protección y medida, etc. Están estipulados y regulados por ley. [36]

Así pues, a continuación se distinguirá entre los dos tipos de instalaciones a realizar con paneles solares, conectadas a red o aisladas.

El primer esquema hace referencia a una instalación aislada y el segundo a una conectada en red, la diferencia fundamental entre una y otra es la no necesidad de acumuladores en la segunda ya que trabajan conjuntamente con la red. Al funcionar con red, la necesidad energética en momentos en que esta no esté disponible se ve suplida gracias a la red. De esta manera, siempre que haya una red disponible se conectará a esta, eliminando el coste de compra de baterías, reduciendo el coste de mantenimiento y, sobretodo, la seguridad de suministro de energía.

Otro aspecto que les diferencia es el inversor, en las instalaciones en red ha de estar programado para conseguir que la tensión de salida de la instalación sea la tensión de la red eléctrica, es decir, que estén en fase. Además, como medida de protección, debe de dejar de funcionar si no existe tensión en la red.

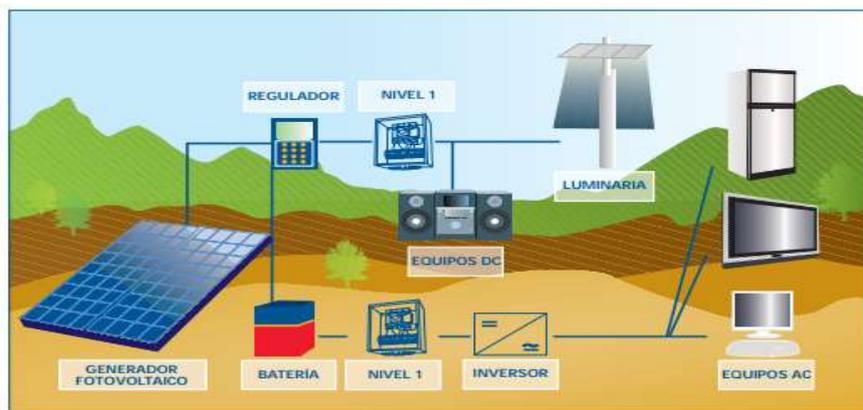


Figura 39: Instalación FV aislada. FUENTE: [30]

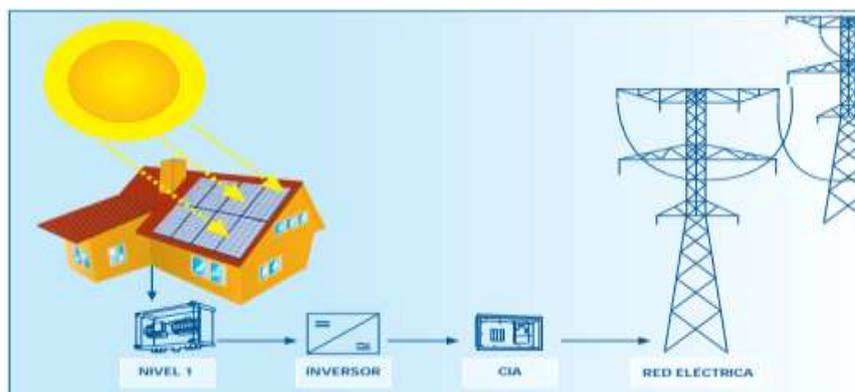


Figura 40: Instalación FV conectada en red. FUENTE: [30]

## Capítulo 6: Diseño y desarrollo de la instalación solar fotovoltaica

La metodología a seguir para realizar el proyecto propuesto se divide en dos partes fundamentales:

Parte sociológica del proyecto:

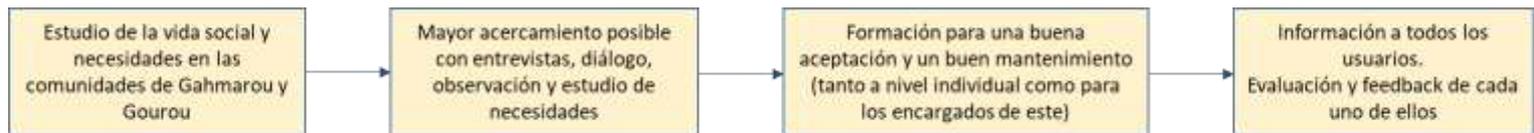


Tabla 7: Parte sociológica de un proyecto. FUENTE: Elaboración propia

Y la parte técnica del mismo:

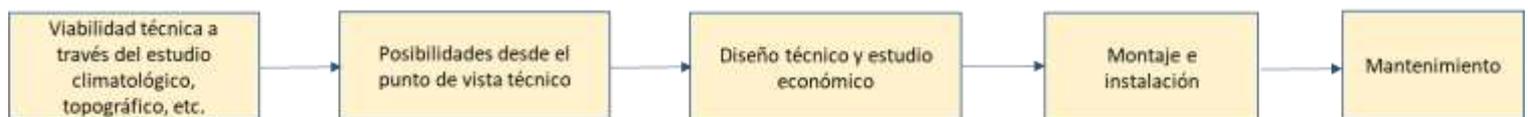


Tabla 8: Parte técnica de un proyecto. FUENTE: Elaboración propia

A continuación se llevará a cabo desde el punto de vista técnico la parte de diseño, montaje y mantenimiento; y desde el social lo correspondiente a informar a los usuarios y evaluación de la instalación. El resto de apartados sobre la metodología se han realizado en puntos anteriores de este trabajo como la viabilidad técnica y diferentes posibilidades de diseño. Sin embargo, algunos de los aspectos sociales han sido directamente obtenidos gracias a la ONG OAN Internacional que realizó el estudio de necesidades y vida social en Nikki.

Es importante antes de embarcarse en una amplia descripción de la instalación, tener claro las consecuencias e impactos que tendrá la llegada de este tipo de tecnología a una comunidad rural aislada como es Nikki, yendo estos más allá de suplir la necesidad eléctrica existente. Los cambios entran dentro del ámbito social y cultural y de cómo se desarrollará la comunidad. Esta serie de cambios no son espontáneos sino que se pueden prever debido a que hacen referencia a la evolución de una comunidad poco desarrollada.

Uno de los efectos fundamentales es el cambio de ritmo de vida cotidiana. Dotar a una comunidad de iluminación y comunicación rompe con la idea de marginación social. De esta manera, también se reduce el aislamiento de la población, gracias al acceso a los medios de comunicación como pueden ser televisiones, radios, internet, etc. Hay que tener en cuenta que los patrones y necesidades básicas de un país desarrollado no son generalmente los mismos que en un país como Benín, por ello, hay que respetarlos y aceptarlos. Se busca potenciar y mejorar sus condiciones de vida evitando imponer cualquier patrón externo.

Sin lugar a dudas, la distribución vertical jerárquica existente en la zona este de Benín se puede ver modificada. La no dependencia de grupos sociales más altos que tenían acceso a la energía,

y por tanto, proporcionaban electricidad a Nikki puede contribuir al cambio por una sociedad más horizontal.

Por último, uno de los factores más importantes o quizá el que más es la capacidad de autogestión de la energía. Una vez realizado todo el proyecto, y a lo largo de la puesta en marcha y mantenimiento, cambia radicalmente la posición de la comunidad respecto a lo anterior. La instalación fotovoltaica puede contribuir a que la ciudad de Nikki sea dueña de su propia evolución, otorgándole un cierto grado de libertad respecto a la dependencia de otros países vecinos.

## 6.1 Diseño

El objetivo principal de este apartado es el cálculo de los equipos y sus parámetros presentes en la instalación, asegurando la fiabilidad de esta. Es fundamental que exista una precisión de cálculo de los parámetros de cada elemento, ya que un sobredimensionamiento aseguraría suplir la demanda de energía a costa de aumentar la inversión inicial del proyecto y no resulta interesante al tratarse de un proyecto social.

El método de diseño que se va a seguir es el llamado método del “mes peor”, esto es, basar los cálculos de los elementos para que sea posible el funcionamiento en el mes en el que la demanda de la comunidad sea mayor y la radiación solar sea menor. De esta manera, se asegura la fiabilidad de la instalación durante todos los meses del año.

### 6.1.1 Datos previos

Antes de analizar los equipos es necesario hacer un repaso de los datos más importantes presentados a lo largo del trabajo. En primer lugar, la potencia demandada por la comunidad, ésta siempre ha sido analizada desde un punto de vista realista, es decir, considerando el funcionamiento simultáneo de aparatos tanto dentro de la casa como en las tiendas. Además del consumo continuo en supermercados debido a refrigeradores y en viviendas en relación con la antena, wifi, neveras, etc.

En segundo lugar, la energía solar disponible. Gracias a la plataforma PVGIS y tras realizar una serie de estudios, se ha obtenido la potencia eléctrica útil recibida por el Sol sin tener que realizar cálculos con la irradiación. Con el mismo programa, se ha podido variar el ángulo de inclinación y orientación de los paneles solares que maximiza la extracción de energía. Como resultado de esto, se obtuvo que el mejor ángulo era  $0^\circ$ , es decir, los paneles situados totalmente horizontales. La principal causa de ello es la situación de Nikki en el Cinturón del Sol y tan próximo a la línea del Ecuador. La no necesidad de utilizar un seguidor o variar la inclinación y orientación de los paneles a lo largo del año supone una ventaja en cuanto a costes de inversión inicial y facilidad de mantenimiento.

A continuación se presenta una gráfica donde se compara la potencia demandada por la comunidad como la potencia recibida por el Sol en el mes peor (mes de agosto). Como se

mencionó anteriormente, esta estimación de energía demandada se mantiene constante debido a que durante el periodo de vacaciones, los habitantes de Nikki siguen su rutina habitual.

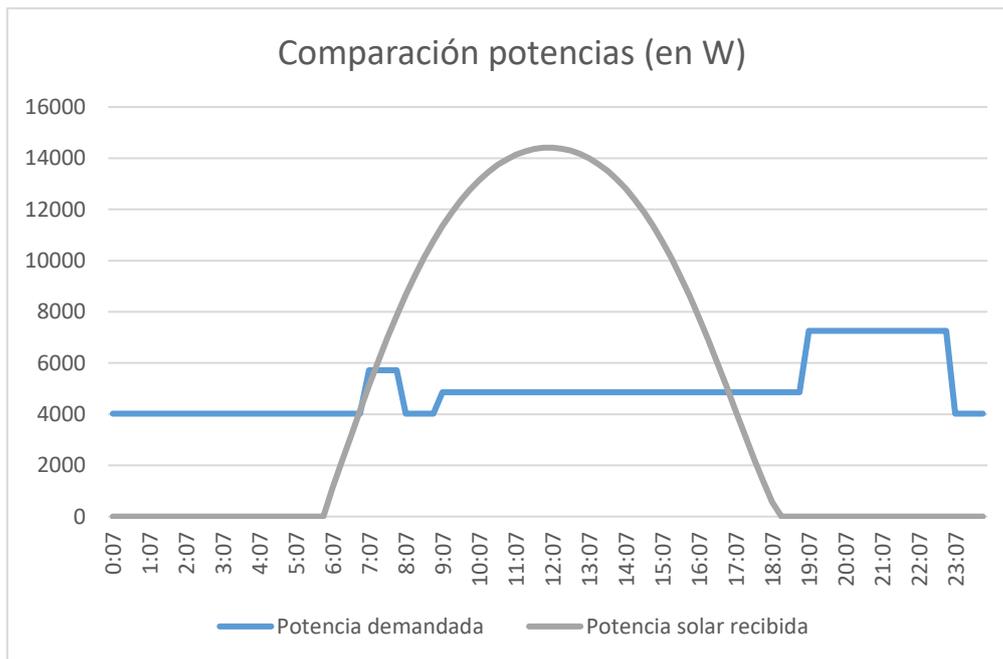


Figura 41: Comparación de potencias demandada y recibida. FUENTE: Elaboración propia

Tras la realización de una integral para calcular el área encerrada dentro de la gráfica de potencia demandada se obtiene que la necesidad energética diaria por los dos poblados es de 119,492 kWh. La energía disponible del recurso solar que puede obtener un generador fotovoltaico horizontal es de 0,66 kWh/m<sup>2</sup>.

Es importante conocer también la tensión nominal y la frecuencia de suministro en Baja Tensión en Benín, ya que estos valores dependen del país, que son: 220V-50Hz. [38]

## 6.1.2 Potencia reactiva

Es importante destacar que el factor de potencia de algunos aparatos eléctricos es bastante bajo y, por eso, hay que tenerlo en cuenta a la hora de dimensionar la planta y más concretamente el inversor. A continuación se presenta el consumo de potencia activa y aparente diaria dividido en cinco grupos fundamentales: consumo de uso doméstico, consumo de uso en tiendas, consumo continuo (tanto en tiendas como en viviendas), el amasador de la panadería cuyo consumo es muy significativo y el alumbrado público.

El factor de potencia de cada uno de ellos se ha hallado tras realizar una media ponderada de los factores de potencia correspondientes a los aparatos electrónicos dentro de cada grupo. Dichos factores de potencia individuales se obtuvieron a partir de estudios previos sobre equipos eléctricos utilizados en África occidental.

	POTENCIAS		
	Activa (W)	cos $\varphi$	Aparente (VA)
Consumo continuo	4020	0,8	5025
Uso en tiendas	832	0,8	1040
Iluminación pública	28	0,6	46,67
Amasador	1700	0,7	2428,57
Uso doméstico	3234	0,65	4975,38

Tabla 9: Factor de potencia de 5 grupos de consumo. FUENTE: Elaboración propia

Una vez definidos los consumos de potencia activa y aparente diarios, se sumará hora por hora definiendo así el perfil de demanda de potencias de la comunidad analizada. La gráfica siguiente representa la variación de potencia que sufre la instalación al tener en cuenta la potencia reactiva existente.

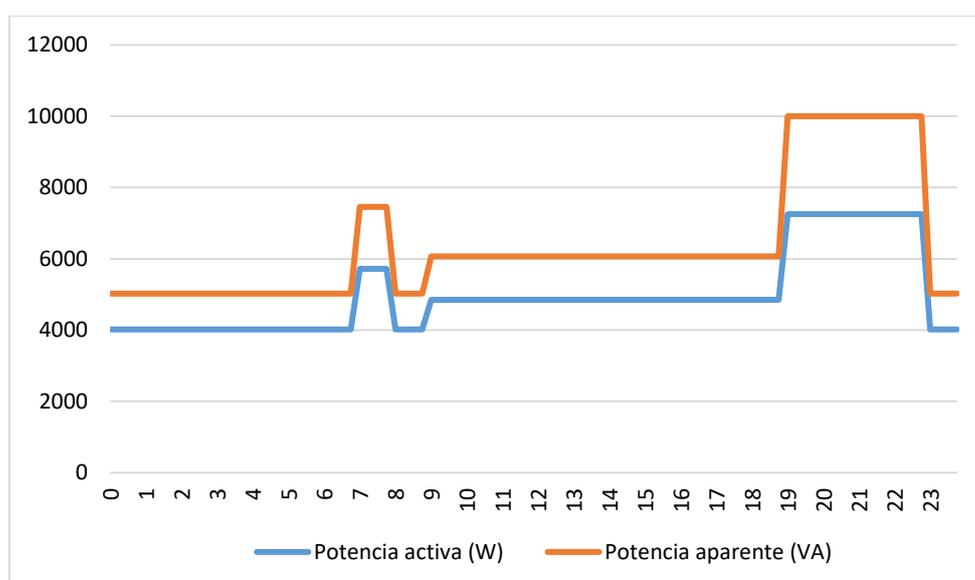


Figura 42: Perfil de demanda horaria de la comunidad. FUENTE: Elaboración propia

Así pues, para tener en cuenta esto en el diseño de la instalación, aparecen dos alternativas. La primera es la instalación de una batería de condensadores que compensen el coseno de  $\varphi$  y la segunda opción es sobredimensionar los inversores para más corriente que la necesaria estrictamente para generar la potencia activa que proviene de los paneles (ahora deben generar Q además de P).

Se opta por la opción del sobredimensionamiento del inversor que se explicará posteriormente en el diseño del mismo. Esto se debe a que como la batería de condensadores no se colocará cerca del punto de destino, el posible ahorro relacionado con el grosor de los cables es mínimo. Además, la simplificación en el mantenimiento de la instalación siempre supone una gran ventaja para el proyecto, cuanto menos cantidad de elementos, más simple será para los encargados en Nikki del mantenimiento.

### 6.1.3 Paneles fotovoltaicos

Los paneles solares fotovoltaicos están diseñados para seguir una arquitectura modular, combinándolos en paralelo, serie o conexión mixta con el fin de ajustarse a las especificaciones requeridas. Para poder proceder a la elección del tipo de panel solar, hay de determinar número de metros cuadrados necesarios de estos.

La energía demanda (a suministrar) es 120 kWh/día y la energía disponible del Sol que puede generar un panel FV es 0,66 kWh/m<sup>2</sup>/día. Por lo tanto, para satisfacer las necesidades energéticas de un día en el mes peor, se necesitarán:

$$\frac{120}{0,66} = 181 \text{ m}^2 \text{ de paneles solares}$$

De entre los paneles disponibles en el mercado y teniendo en cuenta los requisitos tecnológicos, como la capacidad de trabajar a temperaturas elevadas sin que el rendimiento se vea perjudicado, se decide optar por la línea Atersa GS Optimum (admite una temperatura de funcionamiento normal de 45°C). Atersa ofrece una garantía de 10 años frente a defectos de fabricación y 25 años en rendimiento (80% P salida). Esta línea es idónea para el proyecto, con una tecnología de proceso innovadora, un montaje sencillo y una calidad que cumple con los altos estándares internacionales. A pesar de ser un proyecto en una zona rural sin apenas electricidad, siempre se buscará un buen equilibrio entre calidad/precio no yendo a los productos más baratos y que a la larga resulten defectuosos.

Las características del panel solar seleccionado son las siguientes:

Atersa GS Optimum A-255P GS			
P <sub>máx</sub>	255 W	Dimensiones	1640x992x35mm
V <sub>mp</sub>	30,29 V	Peso	17,6 kg
I <sub>mp</sub>	8,42 A	Célula	60, policristalina
V <sub>oc</sub>	37,83 V	Marco	Aleación de aluminio anodizado
I <sub>cc</sub>	8,97 A	Cubierta frontal	Cristal templado de alta transmisión
Eficiencia (%)	15,68	Caja de conexiones	IP65

Tabla 10: Características panel fotovoltaico. FUENTE: Elaboración propia, [39]

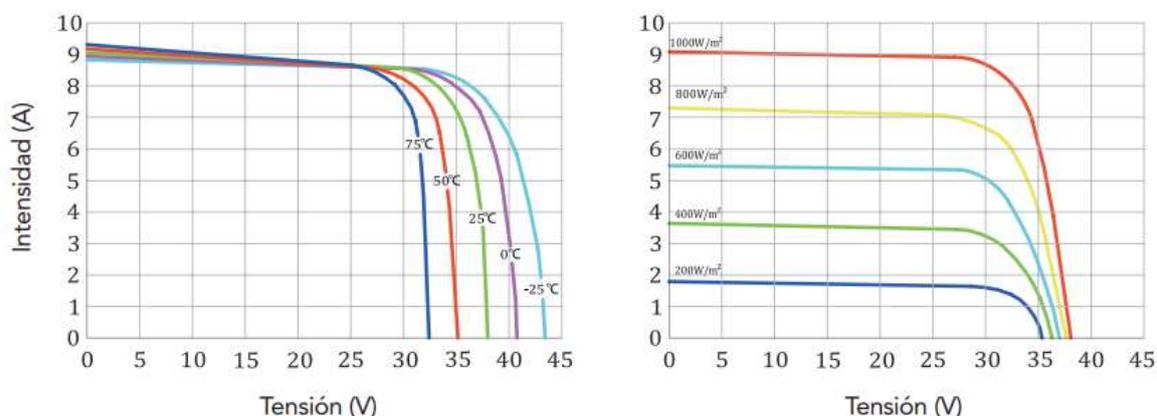


Figura 43: Curvas de I-V en función de temperatura e irradiación. FUENTE: [39]

Después de seleccionar el tipo de panel a utilizar, es necesario determinar número y manera de conectarlos. El número de paneles debe rondar los 112 paneles para cubrir una zona de 181m<sup>2</sup> (1,63 m<sup>2</sup> de área cada panel).

Primero se calculará el número de paneles en serie para conseguir la tensión adecuada. La energía eléctrica que llega a los consumidores se proporciona a 220V (50Hz) y la tensión fotovoltaica se debe encontrar en un intervalo de tensiones recogido por el inversor para su correcto funcionamiento.

*12 paneles conectados en serie y 10 líneas de paneles en paralelo*

En total, se obtienen 120 paneles (12x10). Cada uno de ellos con una potencia pico de 255W. Para calcular los datos finales del conjunto de paneles fotovoltaicos, es decir, la potencia pico total se realizan los siguientes cálculos:

$$\text{Tensión: } 12 \times 30,29 = 363,5V$$

$$\text{Corriente: } 10 \times 8,42 = 84,2A$$

$$\text{Potencia pico total: } 363,5 \times 84,2 = 30,6 \text{ kWp}$$

### 6.1.4 Acumulador

La batería es el elemento del sistema necesario para distribuir energía a los usuarios cuando el Sol no pueda suministrarla. El 54% de la energía demandada a lo largo del día se realiza cuando la energía recibida por el Sol es nula.

Se ha optado por utilizar baterías de litio debido a la mayor vida útil que poseen ligada a la menor degradación frente a las baterías de plomo comúnmente utilizadas y la no necesidad de estar cargadas en su totalidad. Presentan una eficiencia energética entorno al 92% y el peso y espacio que requieren también es mucho más reducido, incluso la mitad. Por último, no emiten ningún gas siendo mucho más respetuosas con el medioambiente y menos peligrosas para sus encargados de mantenimiento. Por tanto, a pesar de su coste más elevado, se considera que las baterías de litio son el “futuro” de las instalaciones fotovoltaicas.

A continuación, para poder seleccionar el tipo de batería es necesario determinar su capacidad de almacenamiento. Para ello y sabiendo que es un elemento muy costoso, se dimensionará para cubrir las necesidades del día (día-noche), es decir, que durante el día se almacene la energía necesaria que se debe suministrar para la noche. De acuerdo a la gráfica que representa la energía demandada con respecto a la generada por los paneles FV, se obtiene que el 54% de la consumida se realiza por la noche. Por ello, la batería debe tener una capacidad de almacenamiento del orden de 65 kWh.

Se han seleccionado las baterías PowerWall2 fabricadas por Tesla, cada una de ellas presenta una capacidad de almacenamiento de 13,5 kWh con una profundidad de descarga del 100%. Por ello, para alcanzar el almacenamiento requerido por la instalación se decide adquirir un banco de baterías formado por 5 Powerwall. Además, cada una de estas trabajan a 50V, lo que permite trabajar con un nivel de tensión en las baterías que sea ligeramente inferior al del generador fotovoltaico que las debe recargar en distintas condiciones de irradiación, y que se garantice el nivel de tensión deseado en el bus de continua que alimenta al inversor.

Las características de este acumulador se presentan en la siguiente tabla:

Powerwall 2 Tesla			
V de entrada	208, 220, 240...	Dimensiones	1150x755x155mm
Energía AC	13,5 kWh	Peso	122 kg
V interno batería	50V	Tipo protector	NEMA 3R
Prof. descarga	100%	T operación	-20°C a 50°C
Eficiencia (%)	89 %	Nivel de ruido	<40 dBA

Tabla 11: Características batería. FUENTE: Elaboración propia y [40]

Después del estudio realizado en el apartado de climatología, se observa que los días nublados son muy poco frecuentes o más bien nulos a lo largo del año. A pesar de ello, si se quisiera aumentar la capacidad del acumulador, cada día de autonomía que se desee disponer supondría aumentar la capacidad del acumulador en una cantidad de 120kWh.

## 6.1.5 Inversor

Respecto al inversor hay que tener en cuenta los aparatos que funcionan simultáneamente, no todos los equipos conectados y así se evitará el sobredimensionamiento de este. La potencia demanda en cada instante ya no es la potencia activa, sino la potencia aparente debido al mal factor de potencia que presentan los aparatos consumidores. Por lo tanto, el punto de máximo consumo de potencia aparente se da entre las 19 hasta las 23, con unos valores aproximados 10kVA.

Se decide optar por colocar dos inversores en paralelo, de 7kVA cada uno, ya que la tensión de entrada en continua es solo de 50V (tensión de las baterías). Estos inversores aceptan un amplio rango de tensión de entrada para luego suministrar la energía en alterna a 220V ya que disponen internamente de una etapa elevadora en tensión. Los equipos de la comunidad se dividirán en dos mitades por igual, en función de la energía consumida, para que se alimenten con uno u otro inversor pero siempre de forma equitativa.

El tipo de inversor escogido y sus características se muestran a continuación:

Xtender XTH 8000-48			
V de entrada	38-68V	Dimensiones	230x300x500mm
V de salida	230V	Peso	46 kg
Frecuencia	45-65 Hz	Índice de protección	IP20
Pmáx salida	7000VA	T operación	-20°C a 55°C
Eficiencia (%)	96 %	Garantía	5 años

Tabla 12: Características inversor. FUENTE: Elaboración propia y [40]

La ventaja fundamental de utilizar dos inversores cuya potencia aparente máxima es de 7000VA, es el margen restante que queda entre 14kVA y los 10kVA solicitados por la comunidad. Así pues, se podría admitir un ligero aumento en la demanda.

## 6.1.6 Regulador

Para seleccionar el regulador se decide escoger uno con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), que como se explicó en el capítulo 5, obtiene mayor rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Permite además añadir en serie paneles FV con tensión superior al que presenta el banco de baterías y evitando posibles pérdidas de trabajar en bajo voltaje y alta intensidad de CC.

La instalación contiene 5 reguladores conectados cada uno a un bloque del generador fotovoltaico compuesto por 2 líneas en paralelo, que incluye cada una 9 paneles FV conectados en serie. La salida de los 5 reguladores se conecta al mismo punto tanto en la conexión al acumulador (baterías) como a los inversores.

Por razones de seguridad y protección es obligatorio seleccionar un regulador capaz de disipar una intensidad máxima del 20% superior que la intensidad pico que proporcionan los paneles solares. Esto es:

$$1,2 \times 2 \times 8,42 = 20,2 \text{ A}$$

La tensión de entrada con la que trabajará cada regulador de tensión será por tanto:

$$1,2 \times 30,29 = 363,5 \text{ V}$$

En la tabla siguiente se presentan las características del regulador escogido:

Vario String VS-120			
V nominal batería	48V	Dimensiones	133x322x406mm
V máx paneles	500paral, 750serie	Peso	7,5 kg
Pmáx entrada	7000 W	Garantía	5 años
Imáx entrada	120 A	Funcionamiento en paralelo	hasta 15 equipos
Consumo propio	<1,25W	Índice de protección	IP20
Eficiencia (%)	>98	Protección fallo a tierra	programable

Tabla 13: Características regulador. FUENTE: Elaboración propia: [42]

## 6.1.7 Conexión de los equipos

Como última fase de la parte del diseño, se explicará brevemente la composición de la instalación fotovoltaica y la conexión de los equipos.

En primer lugar, debido a la existencia de 5 reguladores que admiten gran cantidad de tensión proveniente de los paneles FV se deciden realizar 5 agrupaciones de paneles conectados cada uno con un regulador. Esta agrupación consta de 2 líneas en paralelo y cada línea compuesta por 12 paneles en serie, presentando cada uno la siguiente potencia pico:

$$\text{Tensión: } 12 \times 30,29 = 363,48 \text{ V}$$

$$\text{Corriente: } 2 \times 8,42 = 16,84 \text{ A}$$

$$\text{Potencia pico total: } 363,48 \times 16,84 = 6,1 \text{ kWp}$$

Por último, se presenta un esquema a modo de resumen para explicar la colocación de todos los elementos de la planta y algunos datos más característicos de cada uno de ellos:

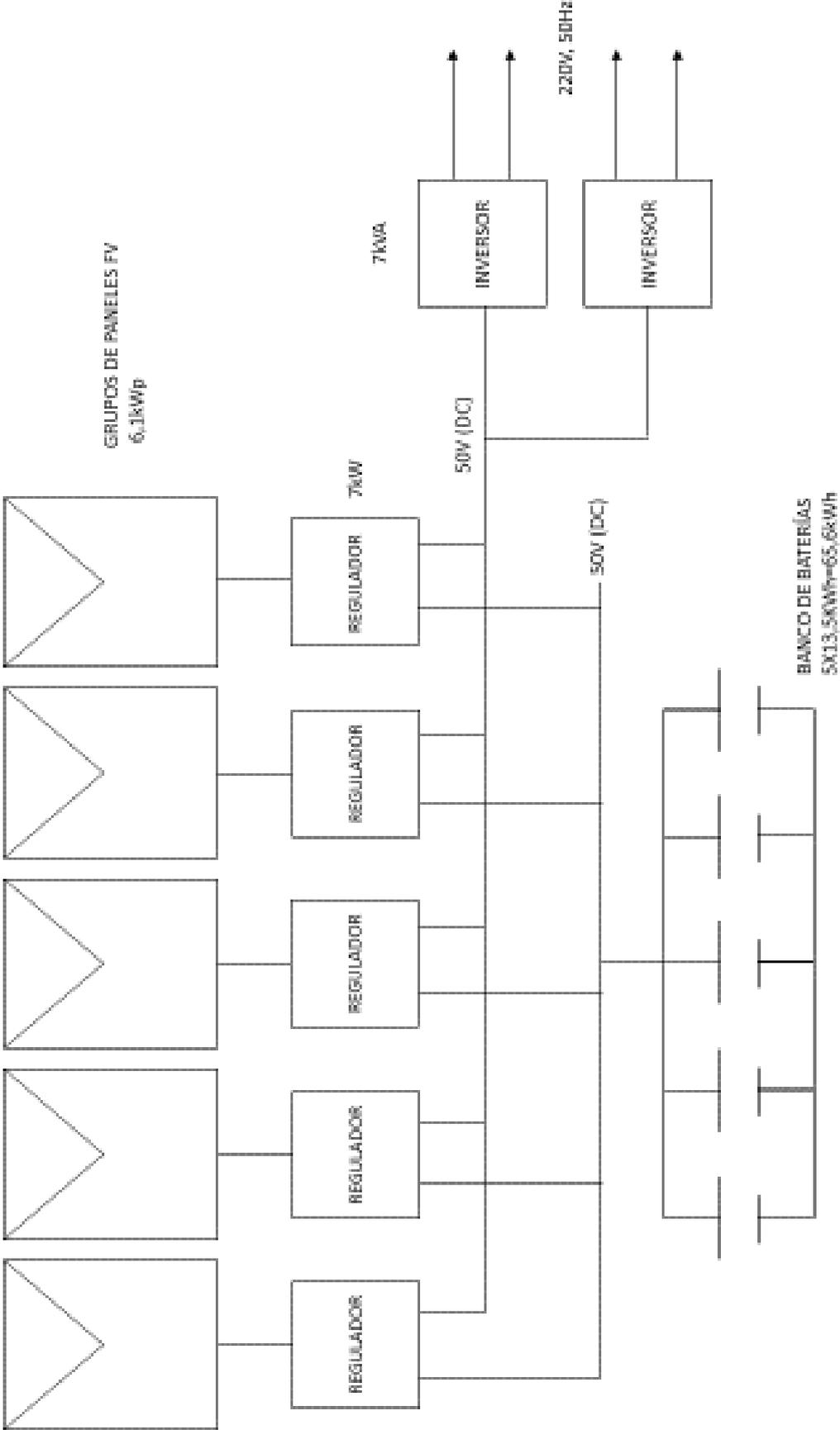


Figura 44: Esquema de la instalación FV. FUENTE: Elaboración propia

## 6.2 Montaje y puesta en marcha

Una vez realizado el dimensionado y seleccionados los equipos de la instalación se procede al montaje de la misma. En esta fase, como en las anteriores y siguientes es de vital importancia la implicación de la comunidad para que el proyecto alcance el éxito, sobretodo, porque es el primer contacto de los consumidores con la instalación FV. Para ello, se introducirá mano de obra local y posibles cursos formativos sobre el funcionamiento de la instalación, desarrollando así el sentimiento de responsabilidad y pertenencia preciso. No debe existir ninguna duda respecto al funcionamiento y se dejará por escrito todo lo necesario a saber, tanto para los usuarios como para los encargados de mantenimiento.

A continuación se presenta un esquema de los puntos fundamentales a seguir:

- Determinar el emplazamiento de la instalación desde un punto de vista tanto técnico como social
- Adquisición de los equipos, incluyendo tanto compra como transporte
- Construcción de las estructuras de posicionamiento de los paneles solares (se elevarán ligeramente para reducir necesidades de limpieza y permitir circulación de aire para refrigerar)
- Colocación y conexión de los paneles fotovoltaicos
- Diseño de caseta para proteger las baterías, equipos de control y regulación, y para almacenar instrumentos necesarios para el mantenimiento
- Conexión del tendido de cables y protección de los mismos
- Pruebas de funcionamiento y puesta en marcha

Seguidamente, se pasará a la definición del lugar de emplazamiento de la planta de energía solar fotovoltaica. El resto de puntos comentados no se desarrollarán más en profundidad pues quedan fuera del marco de estudio de este proyecto.

Tras realizar un estudio de mapeo, se determina que el área que cubre la zona de mayor acumulación de viviendas del arrondissement de Nikki es de 7 km<sup>2</sup>.

En la imagen siguiente se muestra un posible posicionamiento de la instalación que ocupa un área aproximada de 330m<sup>2</sup>. Se ha seleccionado ese lugar, no solo por ser el más próximo a los poblados estudiados sino por serlo a todas las viviendas existentes. Esta colocación permite no solo una posible expansión de la comunidad sino también un acceso sencillo por carretera. En la segunda imagen se puede apreciar una carretera secundaria que conecta la carretera principal con el emplazamiento de los paneles. No se ha querido aproximar demasiado la instalación a las carreteras debido a que supondría aumentar la frecuencia de limpieza a causa del polvo y otras suciedades que se depositarían en los paneles.



*Figura 45: Situación de la instalación propuesta. FUENTE: Elaboración propia y Google Earth*



*Figura 46: Situación detallada de la instalación. FUENTE: Elaboración propia y Google Earth*

## 6.3 Mantenimiento y evaluación

Tras el diseño y montaje de la instalación es necesario realizar un seguimiento del proyecto, tanto de carácter social como técnico.

El mantenimiento de una instalación energética es uno de los puntos más significativos para un correcto funcionamiento, prevenir problemas y disfunciones y evitar cualquier pérdida económica dentro del proyecto. Desde un punto de vista técnico es completamente inevitable y han de estar involucrados tanto los propios usuarios de la electricidad, como los responsables de la instalación.

Al tratarse de un proyecto social la parte relacionada con la evaluación resulta algo crítico para que este tenga éxito. Esta fase, comúnmente olvidada, debería tener una duración de dos a tres años iniciándose al comienzo del funcionamiento de la instalación. Es fundamental analizar la integración del proyecto con la sociedad, la variación de hábitos y el desarrollo de la misma tras la llegada de la instalación fotovoltaica, es decir, si ha tenido la influencia deseada y como ha reaccionado esta, en cuanto a producción energética, necesidades de mantenimiento, fiabilidad, etc.

### 6.3.1 Mantenimiento de la instalación

Como cualquier instalación técnica, una instalación fotovoltaica tiene estipulado un mantenimiento tanto preventivo como correctivo. La ventaja fundamental de este tipo de tecnología es el reducido y sencillo mantenimiento que requiere, lo que evita el trabajo diario sobre la instalación. Sin embargo, es vital que se realice con una periodicidad rigurosa para obtener un rendimiento mayor y alargar la vida útil del proyecto.

Es fundamental la implicación de la comunidad en las operaciones de mantenimiento de la instalación pues serán ellos los que puedan estar pendientes y atentos en el día a día de esta. Así se consigue, además, el sentimiento de propiedad de los habitantes con la instalación, y que no se desentiendan de esta. En una instalación descentralizada como es la propuesta en el proyecto, es muy importante que todos los usuarios de la electricidad tengan toda la información necesaria y una idea básica del funcionamiento de la instalación para poder detectar de forma sencilla, con una inspección visual, cualquier anomalía existente. Además, hay que tener en consideración que las principales averías que surgen en una instalación fotovoltaica tienen su origen en el mal uso por parte de los usuarios de la tecnología (consumir más energía o demandar más potencia de la diseñada). Por consiguiente es crucial el sentimiento de responsabilidad para sacarle el mayor partido posible y evitar cualquier problema.

A pesar de la concienciación de todos los consumidores de electricidad, es necesario la elección de una o varias personas encargadas del mantenimiento de la instalación. Para cubrir este papel se suele seleccionar a personas que hayan colaborado con el montaje de la instalación, es decir, que ya se encuentren familiarizados con la tecnología y sean aptas para ello. El encargado de mantenimiento debe ser capaz de afrontar todas las tareas que implica su puesto y conocer las averías posibles más frecuentes. Además debe tener especial cuidado con seguir todas las instrucciones del suministrador y acudir a él en caso de alguna duda, realizando revisiones completas con una frecuencia máxima de cinco meses.

Conviene resaltar que cualquier sustitución de encargados de mantenimiento requiere una formación previa por parte de los antiguos responsables para el trabajador que adquiera el nuevo puesto. De esta manera se evitarán problemas que hayan surgido con anterioridad aumentando el rendimiento de la instalación y reduciendo las pérdidas económicas.

A continuación se presenta un esquema con los principales equipos y sus necesidades de mantenimiento en función de la frecuencia con la que el fabricante recomienda hacerla. Resulta interesante la realización de una “memoria de mantenimiento” donde cada encargado introduzca la fecha y las operaciones realizadas. Hay que tener en cuenta que los acumuladores son los equipos más delicados de la instalación y es donde es esencial ser más riguroso para no reducir su vida útil y rendimiento. Además el líquido que contienen es peligroso por lo que es menester el trabajar con equipos de protección (guantes y ropa larga) además de llevar agua fresca en caso de accidente.

FRECUENCIA EQUIPOS	Semanal-mensual	Semestral
<b>Paneles</b>	Con regularidad: <b>-Limpieza:</b> cuando se observe excesiva suciedad (polvo no es tan nocivo como excrementos de aves). Con agua, nunca a presión, y jabones no abrasivos. <b>-Prevención de sombras:</b> eliminar cualquier tipo de árbol o rama que impida la radiación sobre el panel <b>-Inspección visual:</b> detectando fracturas en este u oxidación y corrosión en los circuitos y soldaduras del encapsulado	<b>-Inspección visual</b> <b>-Cables y conexiones eléctricas:</b> comprobación si están bien apretados y aislados de humedad sin oxidación. <b>-Medida de características de los paneles</b> (no hace falta que sea semestral): comprobación del correcto funcionamiento de cada uno de ellos.
<b>Acumuladores</b>	Con regularidad: <b>-Inspección visual:</b> detectar fugas, suciedad, corrosión, placas sueltas, etc. Mensualmente: <b>-Limpieza:</b> de polvo y otros restos en la superficie de la batería. <b>-Nivel de disolución electrolítica:</b> comprobación en los vasos del acumulador de agua destilada. <b>-Cables y conexiones eléctricas:</b> inspección de los bornes, limpieza de posibles sulfatos y protección con vaselina neutra.	<b>-Tensión de carga:</b> desconexión de elementos y medida de la tensión sin carga del banco de baterías e individualmente. <b>-Vigilar estratificación de electrolito:</b> si hay residuos se procede al burbujeo para la homogenización y aplicación de carga de igualación (material activo de las placas se convierte en Pb o PbO <sub>2</sub> ) <b>-Reciclaje de acumuladores:</b> debido a los líquidos nocivos de las baterías, hay que entregarlas, por ejemplo, al nuevo suministrador.
<b>Aparatos de control</b>	Con regularidad: <b>-Vigilancia del comportamiento:</b> se realiza de manera involuntaria diariamente. Pero también se incluye comprobación de V e I del regulador.	<b>-Inspección visual</b> <b>-Cables y conexiones eléctricas:</b> comprobación si están bien apretados y aislados de humedad sin oxidación. <b>-Tensión del regulador:</b> comprobación si tensión de sobrecarga y sobredescarga se mantiene.

Tabla 14: Mantenimiento de elementos en una instalación FV. FUENTE: Elaboración propia

### 6.3.2 Evaluación de la instalación

Para el proyecto propuesto, la evaluación y seguimiento de la instalación es algo vital para evitar el fracaso. Muchos proyectos similares, al estar en países lejanos, no han tenido éxito al desentenderse los responsables de la instalación con el país receptor. Es fundamental realizar este seguimiento del proyecto debido a dos factores: es muy fácil que surjan problemas en la puesta en marcha pero cuya resolución es sencilla si se hace con prontitud, por el contrario si se van aplazando conducirá al fracaso del proyecto. El otro factor crítico es el aprendizaje para futuros proyectos tanto sobre la satisfacción y demanda de la comunidad, como la sostenibilidad de la instalación.

Por ello, la evaluación y seguimiento debe englobar tanto aspectos técnicos como aspectos sociales, lo que implica que los responsables de tecnología y sociología deberán visitar la instalación como mínimo durante dos o tres años.

La mejor forma de realizar dicha evaluación es establecer contacto con el mayor número de usuarios posibles con el objetivo de conocer sus opiniones, los problemas que hayan surgido, como ha ido evolucionando su calidad de vida, etc. Es fundamental incluir a las personas más representativas de la ciudad y distintos estilos de grupos sociales.

La evaluación técnica, además de resolver algún problema existente correspondiente a la fase de mantenimiento tiene como tareas principales:

- Comprobar si se realiza un buen mantenimiento de la instalación, tanto de los usuarios como de los encargados de ello. Gracias a la “memoria de mantenimiento” se puede realizar un seguimiento del proceso que se ha llevado a cabo y la frecuencia de realización. Es vital hacer hincapié en la concienciación de las personas sobre el respeto y cuidado de la instalación.
- Establecer estudios sobre el consumo que se haya realizado respecto del estimado inicialmente. Para ello es necesario disponer de datos obtenidos con medidores de Ah en puntos clave de la instalación sobre energía recibida y consumida, y que el encargado los recoja diariamente.
- Atender las posibles demandas de la comunidad sobre el aumento de energía disponible, en la medida de lo posible. Al ser una tecnología modular, siempre se puede plantear una posible inversión en nuevos paneles solares.

La evaluación social es uno de los puntos más importantes y se realizará un estudio tan exhaustivo sobre la comunidad como el realizado previamente a la implantación del proyecto. Se deben destacar el desarrollo y cambios socioculturales y socioeconómicos que se hayan producido a lo largo de la puesta en marcha del proyecto. Uno de los aspectos clave es la aceptación de la instalación por parte de la comunidad, tanto de si satisface sus necesidades como de los nuevos servicios que hayan surgido a raíz de esta.

Dentro de la evaluación social también se debe realizar un estudio sobre cambios en la vida económica y productiva. Los grupos sociales principales que se hayan visto más beneficiados, el reparto de poder, la horizontalización jerárquica, etc.

En definitiva, el objetivo fundamental de la evaluación social es analizar si el proyecto ha contribuido realmente al avance y aumento del desarrollo de la comunidad.



## Capítulo 7: Conclusiones y desarrollos futuros

El objetivo fundamental que se pretendía alcanzar con este trabajo era la selección de la mejor alternativa de generación de electricidad para suplir las necesidades existentes en Nikki, situado al norte de Benín, África. De esta manera se podría aumentar la calidad de vida de los habitantes y potenciar el desarrollo del país, respetando siempre su modelo de vida tradicional.

Una vez seleccionada la tecnología a implantar, se ha realizado un desarrollo básico sobre los pasos a seguir para establecer la instalación fotovoltaica en Nikki, pasos relacionados con de dimensionamiento, diseño, montaje, puesta en marcha, mantenimiento y evaluación.

A raíz de este estudio se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El acceso a la electricidad es un condicionante del desarrollo y calidad de vida en todos los países. En Benín, la tasa de electrificación rural es solamente de un 4% y las únicas conexiones que tienen es mediante una desviación de una instalación colindante. Esto conlleva la existencia de caídas y subidas de tensión, dos o tres veces diarias, que estropean los aparatos conectados a esta. Además de la limitación de la vida social a las horas de Sol.
- Para garantizar la sostenibilidad ambiental, se opta por evaluar las posibles tecnologías de fuentes renovables y no seguir la tradición de los grupos electrógenos. La solar es la única capaz de suministrar la energía demandada por la comunidad tras haber realizado el estudio climatológico de la zona en concreto. Además, hay que tener en cuenta, que el éxito de un proyecto como este, motivaría a otras zonas e incluso otros países por optar por energía renovable y dejar de lado poco a poco los combustibles fósiles.
- Un punto a favor de potenciar el uso de fuentes renovables son las posibles subvenciones recibidas por el Gobierno de Benín. Estas no supondrían una amplia cantidad de dinero, pero cualquier ayuda siempre es bien recibida.
- El diseño y dimensionamiento de la instalación solar fotovoltaica se ha realizado con alto margen de seguridad, sin escatimar en la potencia consumida por los aparatos existentes y la simultaneidad de cada uno. De esta manera, se puede asegurar el correcto funcionamiento de la planta bajo cualquier situación.
- Un aspecto fundamental a considerar es la constante búsqueda de diseñar una planta de alta calidad, no siempre buscando componentes baratos y de menor vida útil que, a largo plazo, aumenten los costes de mantenimiento. Se ha tenido presente el equilibrio de calidad/precio en todas las decisiones propuestas. No se busca una instalación que pueda suplir la demanda durante unos pocos años, sino un punto de referencia para otros posibles poblados que busquen aumentar su calidad de vida.
- Decidir el emplazamiento de la instalación no ha sido tarea sencilla puesto que los datos que se conocían eran limitados acerca de la división de comunas y arrondissement. Para ello se ha usado GoogleEarth como herramienta fundamental para evaluar las características del terreno junto con la información propuesta por OAN Internacional.

## Conclusiones y desarrollos futuros

- Desde un punto de vista enfocado a aumentar la vida útil de la instalación, se opta por realizar revisiones y seguimientos con mayor frecuencia que la estipulada. Se decide dotar a cada encargado del mantenimiento con una “memoria de mantenimiento” que podrá rellenar para comprobar la correcta realización de cada uno de estos.
- Por último, respecto al montaje, mantenimiento y evaluación, siempre se ha optado por el apoyo al plano laboral y oportunidades del propio país. No solo se busca apoyar la autonomía de este, gracias al Sol como fuente de energía autóctona, sino también autonomía a nivel de los trabajadores. A través de la introducción de todos los usuarios en la instalación, desde la primera fase hasta la última, se consigue desarrollar el sentimiento de responsabilidad y propiedad de cada uno. Nadie podrá cuidar y mantener mejor la instalación que los propios usuarios benineses.

A continuación se explican brevemente los posibles desarrollos futuros en relación con el trabajo realizado.

La idea de utilizar una instalación fotovoltaica tiene como ventaja, frente a otro tipo de instalación, la posibilidad de aumentar está en función de la demanda energética de la comunidad y del crecimiento de población. No sería realista dotar a dos pueblos de electricidad, sabiendo que la comuna de Nikki está formada por otros cinco poblados que carecen de esta. La idea fundamental es optar por un aumento progresivo de la oferta eléctrica basándose en la arquitectura modular de la instalación poco a poco, y ajustarla perfectamente a los nuevos requerimientos. La manera de aumentar la oferta es, simplemente, conectando paneles fotovoltaicos y el resto de elementos en serie o paralelo. Las fases nuevas a realizar son fáciles y rápidas, mucho más que al comienzo del proyecto.

Este fenómeno social y económico es característico en este tipo de instalaciones, por lo tanto, tendrá que tenerse en cuenta. Sin embargo, al desconocer la demanda eléctrica de los cinco poblados de alrededor de Gahmarou y Gourou, ha quedado fuera del alcance de este trabajo la estimación necesaria para la comuna en su totalidad. Sin lugar a dudas, la ampliación de la instalación es objeto de posterior investigación, una vez que se consigan todos los datos del resto de poblados.

## Capítulo 8. Planificación temporal

La clave del éxito en un Trabajo de Fin de Grado es la capacidad de planificar los objetivos a cumplir en un espacio temporal definido. Se requiere un alto nivel de compromiso puesto que ha sido un trabajo realizado a la vez que se estudiaba. Es muy importante definir la estrategia y establecer objetivos a corto y medio plazo para poder alcanzar el fin último.

*“Planificación, procedimiento y perseverancia, lo tengo tatuado en mi memoria”* de John Lanchester.

Se utilizarán por tanto dos tipos de herramientas empleadas en la planificación de cualquier tipo de proyecto:

- EDP (estructura de descomposición de un proyecto) división jerárquica de las tareas a desarrollar.
- Diagrama de Gantt es un recurso mucho más visual que los anteriores que permite situar cada tarea en un eje cronológico. El eje horizontal son los tiempos asignados a cada tarea y el vertical son las tareas que se realizarán.

### 8.1 Estructura de Descomposición del Proyecto

Las etapas en las que es posible dividir el trabajo son:

- Elección del proyecto: esta tarea conlleva la selección de un tema propuesto por OAN Internacional y la aceptación del mismo por la ONG, búsqueda de un tutor dispuesto a llevarlo a cabo y definición de objetivos que se quieren alcanzar.
- Documentación: es, sin duda, la parte que más tiempo ha supuesto junto con la formación. La documentación sobre trabajos existentes no solo en África, sino en todo el mundo, relacionados con energías renovables han sido clave para la toma de decisiones posterior. También la falta de datos de rápido acceso sobre la comunidad de Nikki ya que es una zona rural aislada, ha supuesto una búsqueda muy profunda tanto a nivel climatológico como de consumo y uso de la energía allí.
- Formación: esta tarea también ha sido larga debido al desconocimiento de muchos de los conceptos utilizados. Se ha realizado a través de tutorías y mails con el tutor del trabajo e individualmente con búsqueda y lectura de información. Los conceptos a adquirir eran, fundamentalmente, sobre energía solar y más en concreto sobre los equipos necesarios para diseñar la instalación.
- Toma de decisiones: esta es la parte más importante y crucial de todo el trabajo. Tras haber analizado toda la información encontrada y leída y asimilado los conceptos recibidos por el tutor, se pasa a la elección de la mejor opción tecnológica a implantar.
- Resultados y análisis: Tras la toma de decisiones, lo siguiente ha sido el diseño, dimensionamiento, montaje, mantenimiento y evaluación de la instalación solar fotovoltaica. Seguido de este estudio, se encuentran las conclusiones obtenidas y las posibles previsiones de crecimiento de la planta modular.

A continuación se muestra la estructura del EDP:

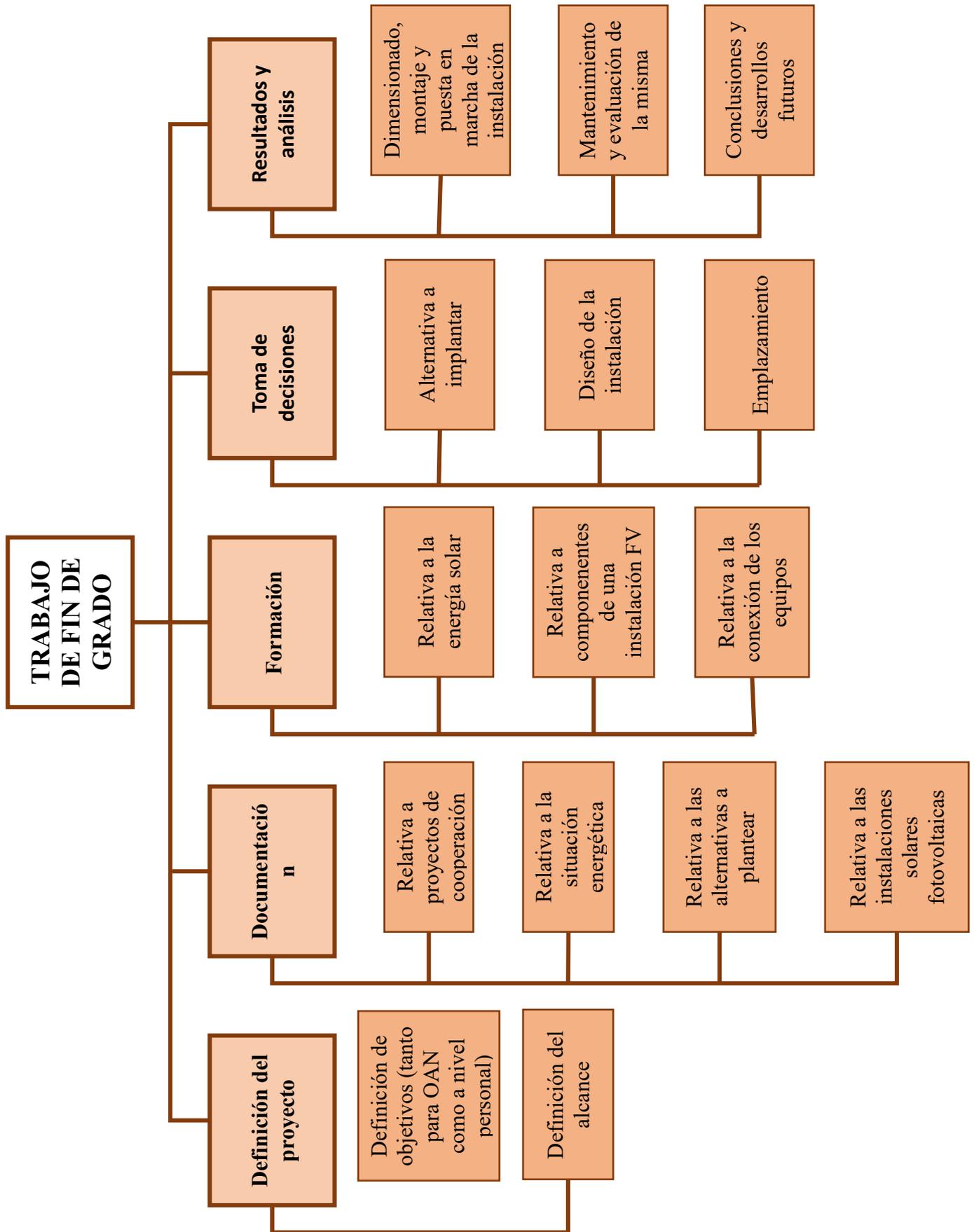


Figura 47 Estructura de Descomposición del proyecto. FUENTE: Elaboración Propia.

## 8. 2 Diagrama de Gantt

La siguiente herramienta a utilizar es el diagrama de Gantt, que presenta la secuencia de las actividades a realizar en un marco temporal.

Tal y como se muestra a continuación, tras la aceptación por parte de OAN Internacional y del tutor de la propuesta de trabajo, transcurren tres meses. Esto se debe a que estuve el primer cuatrimestre en París de Erasmus y no pude retomar el trabajo hasta mi llegada.

Una vez llegado febrero se procede a la primera reunión con el tutor y las primeras skypes con el personal de dirección de proyectos de OAN. Se comienza la búsqueda de información sobre Nikki a través de la literatura propuesta por OAN y sobre los proyectos existentes de cooperación con objetivo de electrificar una comunidad. A su vez, comienza la tarea de formación acerca del funcionamiento de la energía solar fotovoltaica. Estas tareas resultan ser las más laboriosas y las que requieren al principio mayor dedicación debido a la falta de conocimiento sobre el tema. A su vez, además, se asistía a clases para finalizar el Grado.

Un mes después se comienzan a tomar las primeras decisiones relativas al tipo de alternativa a implantar. Sin embargo, con la llegada de los exámenes finales del segundo cuatrimestre, se tuvo que abandonar el trabajo pues estos requerían dedicación total. Al final de estos, el estudiante tuvo que irse al extranjero y se pudo retomar el proyecto hasta comienzos de septiembre.

A partir de septiembre, la dedicación al trabajo intentó ser de media jornada ya que era la cuenta atrás. En estos dos últimos meses se tomó la decisión sobre el diseño de la instalación y el número de componentes a utilizar para conseguir la modularidad buscada. Luego se completó con el dimensionado, montaje, puesta en marcha, mantenimiento y evaluación.

Cabe destacar, que la redacción de la memoria ha sido un proceso continuo en el tiempo, a pesar de la mayor dedicación llegadas las últimas etapas.

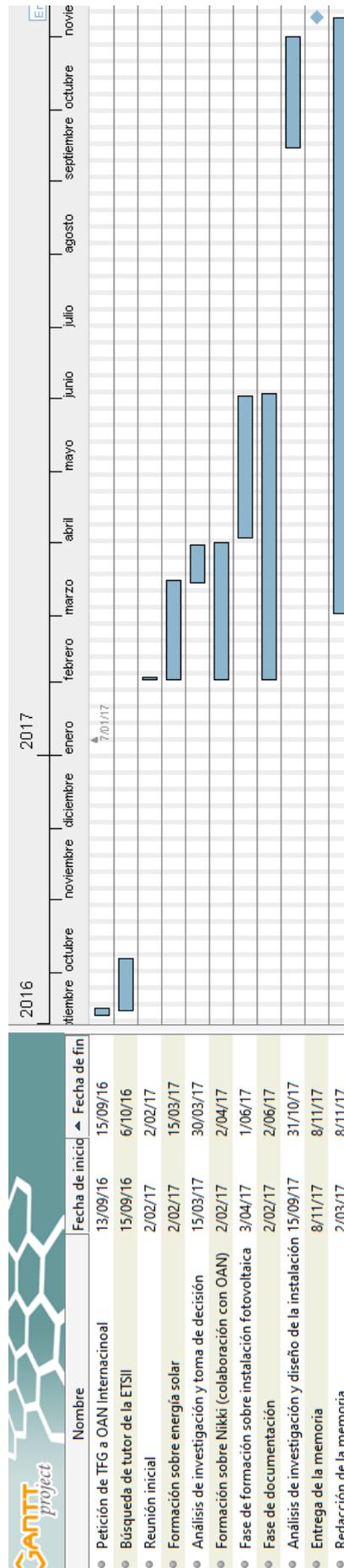


Figura 48: Diagrama de Gantt.

FUENTE: Elaboración propia

## Capítulo 9: Presupuesto

### 9.1 Presupuesto relacionado con la elaboración del TFG

Para la realización del presente Trabajo de Fin de Grado, no se han llevado a cabo ninguna tarea realizada con ensayos en el laboratorio. La elaboración ha implicado el uso de recursos tanto materiales como humanos y, por tanto, esos serán los costes que se recogerán a continuación.

- Costes asociados a recursos materiales: la estimación de estos costes resulta una tarea difícil, como puede ser el coste relacionado con el uso de ordenador, de Internet, del software, etc. Por ello, se realiza una estimación de su vida útil a lo largo de cinco años y se calcula el coste de este en base horaria.

Concepto	5 años	1 año	1 hora	Cantidad de horas	Importe final (€)
Ordenador portátil	1000 €	200 €	0.07 €	430	30
Software	149 €	30 €	0.01 €	200	2
Consumo eléctrico	-	550 €	0.19 €	430	82
<b>TOTAL</b>					<b>114</b>

Tabla 15: Costes asociados a recursos materiales. FUENTE: Elaboración propia

- Costes asociados a recursos humanos: esta estimación hace referencia, fundamentalmente, a las horas invertidas por el estudiante en la realización del Trabajo de Fin de Grado, las horas dedicadas por el tutor y las horas dedicadas por OAN Internacional.

Concepto	Cantidad de horas	Precio unitario (€/hora)	Importe final (€)
Trabajo del alumno	430	9.5	4085
Trabajo tutor	40	30	1200
Trabajo director de proyectos de OAN Internacional	12	30	360
Trabajo personal de OAN toma de datos en África	120	20	2400
<b>TOTAL</b>			<b>8045</b>

Tabla 16: Costes relacionados a recursos humanos. FUENTE: Elaboración propia

Por ello, el coste del proyecto total es:  $(114 + 8045) * 1,21 = 9872.4 \text{ €}$

## 10.2 Presupuesto relacionado con la instalación FV

En esta parte del capítulo se realiza un estudio aproximado de la inversión inicial relacionada con el montaje y mantenimiento de la instalación solar fotovoltaica.

Concepto	Cantidad	Precio unitario	Importe final
Paneles fotovoltaicas	120	185	22.000€
Baterías	5	4.750	23.750€
Inversores	2	5.500	11.000€
Reguladores	5	2.100	10.500€
Cables de distintos grosores	-	-	13.000€
Otros equipos	-	-	2.000€
Sueldo miembros de mantenimiento	3	650/anuales	13.000€
Sueldo profesional de evaluación	1	600/2 años	1.200€
<b>TOTAL</b>			<b>97.000 €</b>

Tabla 17: Inversión inicial aproximada de la instalación FV. FUENTE: Elaboración propia

Los costes indicados son una mera estimación de la inversión inicial y el coste de los operarios de mantenimiento. Respecto a las baterías que siempre suponen un elemento muy costoso, se ha decidido optar por utilizar las baterías de litio de Tesla debido a su bajada de sus precios y su vida útil del orden de 20 años. En cuanto a las personas de Nikki encargadas del mantenimiento, se estima que el trabajo requerido por esta es, sencillamente, de 2-3 horas diarias como máximo. A pesar de ello, se ha calculado un sueldo mínimo anual que cumple con los aspectos legales del Gobierno de Benín.

Se aprecia que los costes del proyecto no son especialmente elevados, esto es el resultado de la búsqueda continua del equilibrio calidad/precio, como debe hacerse en todos los proyectos humanitarios.

Ahora pues, para hacer frente a estos costes, se tiene presente la labor de OAN Internacional u otras ONGs que tengan el presupuesto necesario para la elaboración y construcción de la instalación. Existen además, posibles subvenciones por parte del estado beninés en el apoyo por la electrificación rural. Con todo esto, es posible alcanzar los requerimientos monetarios del proyecto, aun así, se valora la posibilidad de cobrar una determinada cantidad de dinero, de manera simbólica, a los consumidores con el fin de aumentar el sentimiento de valoración y responsabilidad con esta. Este dinero iría destinado a posibles inversiones intermedias de ampliación o tareas de mantenimiento.

## Capítulo 10: Impacto del proyecto

Cualquier proyecto realizado tendrá impactos positivos y negativos, en mayor o menor medida, dependiendo de cómo se desarrolle y en el entorno en el que se haga. Para evaluar los impactos del proyecto presente de manera efectiva, se realizará un estudio más en profundidad acerca de impactos medioambientales, sociales y económicos.

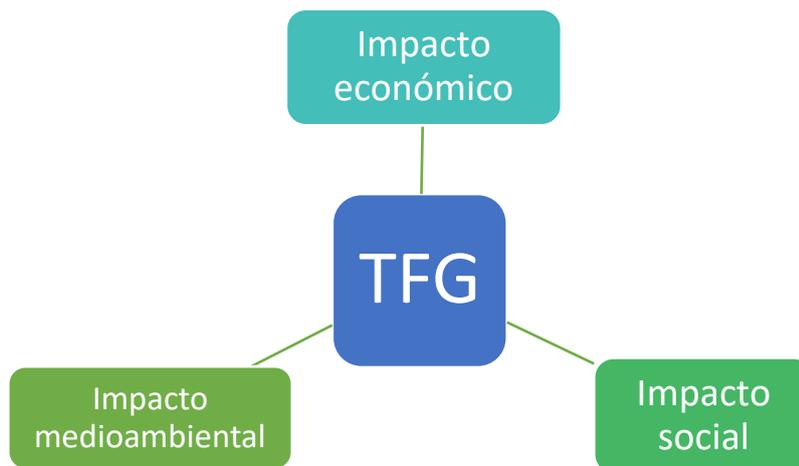


Figura 49: División de impactos del Trabajo de Fin de Grado. FUENTE: Elaboración propia

### 10.1 Impactos económicos

Los impactos económicos fundamentales a destacar de la instalación FV están relacionados con la autonomía eléctrica que esta les confiere. La liberación de dependencia de países vecinos o de otras comunidades más ricas para conseguir electricidad ha llegado a su fin. Por ello, uno de los impactos más importante es la modificación de la estructura vertical jerárquica que existe en la sociedad, contribuyendo a la horizontalidad de esta.

Otro de los aspectos cruciales que implica la instalación está relacionado con el ámbito laboral. La contratación del personal del Comité de Mantenimiento es autóctona de Nikki, promoviendo y enriqueciendo la economía local y apoyando a los grupos sociales marginados.

Sin embargo, otro impacto económico a tener en cuenta será el cobro por el consumo de la electricidad, esto es necesario para aumentar la valoración de la instalación por parte de los usuarios. Sin embargo, será un valor simbólico, el cual no suplirá la inversión inicial requerida para la puesta en marcha de la instalación.

## 10.2 Impactos medioambientales

Generalmente, este estilo de proyectos ingenieriles en los que se desarrolla el proceso de implantación de una instalación industrial, deberían de ir acompañados de un pliego con información acerca de todos los posibles impactos relacionados con este y su magnitud. Para elaborar una recopilación sobre dichos impactos se procede a realizar una división de estos en función de la fase de ejecución en la que se encuentre.

- Etapa de preparación del terreno: consiste en adecuar el terreno para facilitar y hacer viable la construcción de la instalación. Gracias a que la zona de emplazamiento seleccionada es suficientemente plana, sin apenas vegetación y fácilmente accesible gracias a una carretera secundaria, no será necesario la utilización y despliegue de grandes máquinas. Sin embargo, algunos de los impactos medioambientales a tener en cuenta son el despeje del terreno (eliminación de capa de vegetación) y el allanamiento total de este. Las posibles consecuencias serán nubes de polvo y aumento de los niveles de ruido en la comunidad. A pesar de esto, al ser una zona ligeramente apartada y de un tamaño reducido, no supondrá un efecto demasiado importante.
- Etapa de montaje de la instalación: se produce la construcción y montaje de todos los equipos a implantar en la instalación. Las acciones más importantes a realizar que producirán impactos, serán las siguientes: aumento del tráfico en las carreteras debido a la circulación de vehículos de transporte, construcción de estructuras y casetas auxiliares y levantamiento de un muro o valla para la protección y seguridad de la instalación y las personas. Todas estas tareas llevarán consigo impactos visuales (valla), emisiones de CO<sub>2</sub> y NOX debido a los camiones diésel y aumento de niveles de polvo y ruido.
- Etapa de puesta en marcha y operación: comienza tras la iniciación de la instalación. Los principales impactos a tener en cuenta son: producción de aguas residuales ligadas al mantenimiento del equipo (aguas sin añadidos) que aumentan el consumo de agua y generación de energía eléctrica renovable con el objetivo de reducir el impacto del cambio climático. Sin duda, este último impacto resulta muy positivo en comparación con los impactos anteriores producidos, principalmente, por grupos electrógenos y quemado de biomasa.
- Etapa de desmantelamiento: en esta fase se resumen las acciones a tener en cuenta para dejar la zona de emplazamiento de la instalación tal y como estaba antes de la construcción de esta. Será necesario el desmantelamiento de los equipos que la forman, inversamente a lo realizado en la etapa de montaje y con los mismos impactos que esta, pero desechando de manera adecuada todos los equipos. Las baterías requieren especial atención en esta fase debido a que el líquido que contienen resulta muy contaminante para aguas y suelos. Una opción es reutilizar algunas casetas auxiliares, pero al ser módulos, se podrán desechar fácilmente. Y por último, el acondicionamiento del terreno previo al abandono, donde se realizarán plantaciones de vegetaciones autóctonas, o incluso, una pequeña zona de cultivos aprovechando el aplanamiento de este.

### 10.3 Impactos sociales

Es fundamental, al tratarse de un proyecto humanitario, tener presente todos los impactos sociales que pueden aparecer. De esta manera, una de las características que se ha intentado respetar durante toda la realización del trabajo es la importancia del marco social y cultural, ya que limitar cualquier proyecto ingenieril al ámbito técnico exclusivamente supondría el fracaso del mismo. Por ello se ha prestado especial atención a la integración de la comunidad de Nikki a la instalación desde el comienzo.

A continuación, se llevará a cabo una breve descripción de los posibles efectos que producirá en la sociedad, la llegada de este tipo de tecnología a una comunidad rural aislada como es Nikki. Los cambios que conlleva entran dentro del ámbito social y cultural y de cómo se desarrollará la comunidad. Esta serie de cambios no son espontáneos sino que se pueden prever debido a que hacen referencia a la evolución de una comunidad poco desarrollada.

Uno de los impactos fundamentales es el cambio de ritmo de vida cotidiana. Dotar a una comunidad de iluminación y comunicación rompe con la idea de marginación social. De esta manera, también se reduce el aislamiento de la población, gracias al acceso a los medios de comunicación como pueden ser televisiones, radios, internet, etc. Hay que tener en cuenta que los patrones y necesidades básicas de un país desarrollado no son generalmente los mismos que en un país como Benín, por ello, hay que respetarlos y aceptarlos. Se busca potenciar y mejorar sus condiciones de vida evitando imponer cualquier patrón externo.

Sin lugar a dudas, la distribución vertical jerárquica existente en la zona este de Benín se puede ver modificada. La no dependencia de grupos sociales más altos que tenían acceso a la energía, y por tanto, proporcionaban electricidad a Nikki puede contribuir al cambio por una sociedad más horizontal.

Por último, uno de los impactos más importantes o, quizá el que más, es la capacidad de autogestión de la energía. Una vez realizado todo el proyecto, y a lo largo de la puesta en marcha y mantenimiento, cambia radicalmente la posición de la comunidad respecto a lo anterior. La instalación fotovoltaica puede contribuir a que la ciudad de Nikki sea dueña de su propia evolución, otorgándole un cierto grado de libertad respecto a la dependencia de otros países vecinos.

## Referencias

- [1] «Encyclopedia Britannica,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/place/Benin>.
- [2] P. FE, «Benin energie,» [En línea]. Available: <http://www.benin-energie.org/sig/default.asp>.
- [3] «Expansión,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.datosmacro.com/demografia/poblacion/benin>.
- [4] «DeFinanzas,» [En línea]. Available: <https://definanzas.com/paises-subdesarrollados-lista-completa/>.
- [5] «Expansión,» [En línea]. Available: <http://www.datosmacro.com/paises/benin>.
- [6] «Actualitix IDH,» 2016. [En línea]. Available: <https://es.actualitix.com/pais/wld/indice-de-desarrollo-humano-por-pais.php>.
- [7] C. Caballero, «EL País,» Febrero 2016. [En línea]. Available: [http://elpais.com/elpais/2016/02/19/africa\\_no\\_es\\_un\\_pais/1455865200\\_145586.html](http://elpais.com/elpais/2016/02/19/africa_no_es_un_pais/1455865200_145586.html).
- [8] «Banco Mundial,» [En línea]. Available: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/507941468186874625/pdf/94584-2009Sep17-P079633-Benin-Electricity-Services-Delivery-Project-SPANISH-Box-385437B-PUBLIC.pdf>.
- [9] «USAID,» [En línea]. Available: <https://www.usaid.gov/powerafrica>.
- [10] R. González, «Twenergy,» Abril 2012. [En línea]. Available: <https://twenergy.com/a/potencial-de-las-energias-renovables-en-africa-533>.
- [11] «Central energía,» Octubre 2010. [En línea]. Available: <http://www.centralenergia.com>.
- [12] «Energypedia,» [En línea]. Available: [https://energypedia.info/wiki/Benin\\_Energy\\_Situation](https://energypedia.info/wiki/Benin_Energy_Situation).
- [13] «Banco Mundial,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.bancomundial.org/es/about/annual-report/regions/afr>.
- [14] «GIZ,» [En línea]. Available: <https://www.giz.de/en/worldwide/29998.html>.
- [15] d. l. G. L. d. l. e. d. l. d. T. Ministere de la Decentralisation, «División del territorio de la comuna de Benín. Plan de developpment communal,» 2011.
- [16] F. A. d. Developpment, «Projet d’électrification rurale par reseau. Republique du Benin. Fonds Africain de Developpement,» 2006.

- [17] «Datos Banco Mundial,» [En línea]. Available: [https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=BJ&name\\_desc=false](https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=BJ&name_desc=false).
- [18] FAOLEX, «Ecolex,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.ecolex.org/details/legislation/loi-no-2006-16-portant-code-de-lelectricite-en-republique-du-benin-lex-faoc080564/>.
- [19] C. Caballero, «El País,» Junio 2017. [En línea]. Available: [http://elpais.com/elpais/2017/06/13/planeta\\_futuro/1497352601\\_568958.html](http://elpais.com/elpais/2017/06/13/planeta_futuro/1497352601_568958.html).
- [20] «WorldMeteo,» [En línea]. Available: <https://www.worldmeteo.info/es/afrika/benin/nikki/tiempo-162558/>.
- [21] «Hikersbay,» [En línea]. Available: <http://hikersbay.com/climate/benin?lang=en#uvtable>.
- [22] J. R. Arribas, «Solar Photovoltaic Generation,» 2016.
- [23] «PVGIS,» [En línea]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=africa>.
- [24] M. Planelles, «El País,» Marzo 2017. [En línea]. Available: [https://economia.elpais.com/economia/2017/03/24/actualidad/1490375147\\_422288.html](https://economia.elpais.com/economia/2017/03/24/actualidad/1490375147_422288.html).
- [25] «Energía renovable en España,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_renovable\\_en\\_Espa%C3%B1a](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_renovable_en_Espa%C3%B1a).
- [26] F. España, «Sistemas híbridos FV Fronius».
- [27] S. a. Smith, «Microelectronic circuits».
- [28] R. Serrano, «TRITEC,» [En línea]. Available: <http://www.tritec-intervento.cl/productos/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>.
- [29] «Energía Solar al Día,» [En línea]. Available: <https://energiasolaraldia.com/abc-de-la-energia-solar-tipos-de-conexion-de-paneles-fotovoltaicos/>.
- [30] U. d. Jaén, «Curso solar,» [En línea]. Available: [https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/3\\_celula\\_03.htm](https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_03.htm).
- [31] PanelesSolaresPR, «Curso paneles solares,» [En línea]. Available: <http://panelessolarespr.com/solar101.html#parte2>.
- [32] NREL, «NREL,» [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/>.
- [33] AENOR, «AENOR,» [En línea]. Available: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0035826#.WdT7RGi0PIU>.
- [34] SMA, «Coeficiente de rendimiento».

## Referencias

- [35] T. Energy, «Tesla,» [En línea]. Available: [https://www.tesla.com/es\\_ES/powerwall](https://www.tesla.com/es_ES/powerwall).
- [36] Monsolar, «Monsolar,» [En línea]. Available: <https://www.monsolar.com>.
- [37] Cahors, «Equipos de protección para instalaciones fotovoltaicas,» [En línea]. Available: [http://boj.pntic.mec.es/crodenas/solares/ut5/Protecciones\\_Cahors.pdf](http://boj.pntic.mec.es/crodenas/solares/ut5/Protecciones_Cahors.pdf).
- [38] SunLight, «TechnoSun,» [En línea]. Available: <http://blog.technosun.com/tabla-de-valores-de-corriente-electrica-y-frecuencia-mundiales/>.
- [39] Atersa, «Atersa,» [En línea]. Available: <http://atersa.com/Common/pdf/atersa/manuales-usuario/modulos-fotovoltaicos/Ficha%20Tecnica%20A-255%20-270P%20GS.PDF>.
- [40] Tesla, «Tesla,» [En línea]. Available: <https://www.energymatters.com.au/wp-content/uploads/2016/11/tesla-powerwall-2-datasheet.pdf>.
- [41] Fronius, «Fronius,» [En línea]. Available: <http://www.fronius.com/en/photovoltaics/products/all-products/inverters/fronius-primo-ul/fronius-primo-11-4-1-208-240>.
- [42] Studer, «Studer Innotec,» [En línea]. Available: <http://www.studer-innotec.com/es/datos-tecnicos/gama-variostring/>.
- [43] «Benin,» [En línea]. Available: <http://www.datosmacro.com/demografia/poblacion/benin>.
- [44] Energía, «Ecologistas en acción,» Junio 2007. [En línea]. Available: <http://www.ecologistasenaccion.org/article10057.html>. [Último acceso: 26 junio 2017].
- [45] S. Innova, «Huella de carbono. Fabricación de módulos fotovoltaicos.,» Solar innova.