

Trabajo Fin de Máster

**Estudio de la optimización multi-objetivo de la
generación eléctrica basada en fuentes
renovables para la alimentación de sistemas
aislados de red en países en vías de desarrollo.**

Autor/es

Eric Montero Vázquez

Director/es

Rodolfo Dufo López

José Luis Bernal Agustín

TÍTULO DEL PROYECTO

Estudio de la optimización multi-objetivo de la generación eléctrica basada en fuentes renovables para la alimentación de sistemas aislados de red en países en vías de desarrollo.

RESUMEN

En torno a los 1.300 millones de personas (aproximadamente un 20% de la población mundial) no disponen de acceso a electricidad, y la gran mayoría residen en las zonas rurales de países en vías de desarrollo. El acceso a la red eléctrica es, en muchas ocasiones, inviable, por lo que el uso de las energías renovables en sistemas híbridos de energía puede suponer una opción factible.

Para garantizar el suministro eléctrico de la forma más económica posible se utilizan diversos métodos de optimización. No obstante, es importante tener en cuenta otros factores que influyen a la hora de la toma de decisiones, ya sean técnicos, medioambientales y/o sociales.

Este trabajo presenta el uso de la herramienta iHOGA para optimización multi-objetivo, basándose en casos reales de comunidades aisladas de países en vías de desarrollo. Se estudian las diferentes alternativas tecnológicas que satisfacen los requerimientos dados, optimizando no sólo el coste total de las instalaciones sino también las emisiones equivalentes de CO₂, la energía no servida, el índice de desarrollo humano y la creación de empleo.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Optimización mono-objetivo y multi-objetivo.....	5
3. Definición de casos de estudio.....	10
3.1. Suministro eléctrico en Taba (Dejen, Etiopía).....	10
3.2. Suministro eléctrico en Palari (Chhattisgarh, India)	13
4. Resultados.....	15
4.1. Suministro eléctrico en Taba (Dejen, Etiopía).....	15
4.2. Suministro eléctrico en Palari (Chhattisgarh, India).	19
5. Conclusiones	22
6. Bibliografía.....	24
Anexo I. Información complementaria sobre definición de casos.....	26
A. Suministro eléctrico en Taba (Etiopía)	26
B. Suministro eléctrico en Palari (India).....	34
Anexo II. Resultado complementarios	38
A. Suministro eléctrico en Taba (Etiopía).	38
B. Suministro eléctrico en Palari (India).....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Frente de Pareto de la optimización multi-objetivo.....	6
Figura 2. Factores de creación de empleo para diferentes tecnologías.	8
Figura 3. Relación entre IDH y consumo de energía eléctrica.....	9
Figura 4. Irradiación solar mensual en Taba.....	10
Figura 5. Recurso eólicoa disponible a 10 m en Taba.....	11
Figura 6. Recurso Hídrico disponible en Taba.....	11
Figura 7. Perfil de carga diaria en Taba.....	12
Figura 8. Irradiación solar mensual en Palari.....	14
Figura 9. Recurso eólico disponible a 10 m en Palari.	14
Figura 10. Perfil de carga diaria de verano en Palari.....	15
Figura 11. coste por componentes en optimización mono-objetivo (Taba).	16
Figura 12. Balance energético Optimización mono-objetivo (Taba).....	17
Figura 13. Frente de pareto de optimización VAN-Emissiones de CO ₂ (Taba).	17
Figura 14. Balance energético optimización mono-objetivo (Palari).	20
Figura 15. Frente de Pareto de optimización VAN-Creación de empleo (Palari).....	21
Figura 16. Irradiación solar horizontal y a 10° en Taba.....	26
Figura 17. Función de probabilidad de velocidad del viento en Taba.	27
Figura 18. Perfil de carga Junio y Septiembre (Taba).....	28
Figura 19. Perfil de carga de Julio y Agosto (Taba).....	29
Figura 20. Curva de potencia del aerogenerador HWP-10.....	31
Figura 21. Curva de rendimiento de turbina hidráulica.	32
Figura 22. Datos de ciclos de vida en función de la profundida de descarga.....	32
Figura 23. Curva de eficiencia del inversor para Taba.....	33
Figura 24. Curva de consumo de diésel del generador.	33
Figura 25. Función de probabilidad de velocidad del viento en Palari.	35
Figura 26. Perfil de carga diaria de invierno en Palari.....	35
Figura 27. Frente de Pareto optimización VAN-Energía no servida (Taba).....	38
Figura 28. Frente de Pareto de optimización VAN-Creación de empleo (Taba).....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Acceso a la energía en millones de personas	1
Tabla 2. Datos sobre las tecnologías seleccionadas (Taba).....	13
Tabla 3. Datos sobre el poblado seleccionado.	13
Tabla 4. Datos sobre tecnologías seleccionadas (Palari).....	15
Tabla 5. Resultados optimización mono-objetivo (taba).	16
Tabla 6. Componentes resultado de optimización mono-objetivo (Taba).....	16
Tabla 7. Análisis de sensibilidad con respecto al precio del diésel en Taba.....	17
Tabla 8. Resultados Optimización VAN-Emissiones de CO ₂ (Taba).....	18
Tabla 9. Resultados optimización VAN-Creación de empleo (Taba).....	18
Tabla 10. Resultado Optimización VAN-IDH (Taba)	19
Tabla 11. Componentes resultado optimización VAN-IDH (Taba).	19
Tabla 12. Resultado optimización mono-ojetivo (Palari).....	20
Tabla 13. Componentes resultado optimización mono-objetivo (Palari).	20
Tabla 14. Análisis de sensibilidad del sistema con el precio del diésel (Palari).....	20
Tabla 15. Resultado de optimización VAN-Emissiones de CO ₂	21
Tabla 16. Resultado optimización VAN-Creación de empleo (Palari).	21
Tabla 17. Resultado optimización VAN-IDH (Palari).....	22
Tabla 18. Resumen de recursos renovables en Taba.....	28
Tabla 19. Detalle de cargas de comunidad en Dejen.....	29
Tabla 20. Datos del sistema fotovoltaico para Taba.....	30
Tabla 21. Datos sobre aerogeneradores para Taba.....	31
Tabla 22. Datos de las baterías para Taba.....	32
Tabla 23. Datos inversor para Taba	33
Tabla 24. Datos del generador diésel para Taba.....	33
Tabla 25. Otros datos de entrada a ihoga (Taba)	34
Tabla 26. Detalle de cargas en la comunidad de Palari.....	36
Tabla 27. Datos del sistema fotovoltaico para Palari.....	37
Tabla 28. Datos de generadores diésel para Palari.....	37
Tabla 29. Componentes resultado optimización VAN-Emissiones de CO ₂ (Taba).....	38
Tabla 30. Balance de energía optimización VAN-Emissiones de CO ₂ (Taba).....	38
Tabla 31. Resultado optimización VAN-Energía no servida (Taba).	39
Tabla 32. Componentes resultado optimización VAN-Energía no servida (Taba).....	39
Tabla 33. Balance de energía optimización VAN-Energía no servida (Taba).	39
Tabla 34. Componentes resultado optimización VAN-Creación de empleo (Taba).....	40

Tabla 35. Balance de energía de optimización VAN-Creación de empleo (Taba).....	40
Tabla 36. Balance de energía de optimización VAN-IDH (Taba).....	40
Tabla 37. Resultado optimización VAN-Creación de empleo-IDH (Taba).....	41
Tabla 38. Componentes resultado optimización VAN-Creación de empleo-IDH (Taba).	41
Tabla 39. Balance de energía optimización VAN-Creación de empleo-IDH (Taba).	41
Tabla 40. Componentes resultado optimización VAN-Emisiones de CO ₂ (Palari).	41
Tabla 41. Balance de energía de optimización VAN-Emisiones de CO ₂ (Palari).	42
Tabla 42. Resultado optimización VAN-Emisiones de CO ₂ -Energía no servida (Palari).	42
Tabla 43. Componentes resultado optimización VAN-Emisiones de CO ₂ -Energía no servida (Palari).	42
Tabla 44. Balance de energía optimización VAN-Emisiones de CO ₂ -Energía no servida (Palari).	43
Tabla 45. Componentes resultado optimización VAN-Creación de empleo (Palari).....	43
Tabla 46. Balance de energía optimización VAN-Creación de empleo (Palari).	43
Tabla 47. Componentes resultado optimización VAN-IDH (Palari).....	43
Tabla 48. Balance de energía optimización VAN-IDH (Palari).....	44

1. INTRODUCCIÓN

En torno a los 1.300 millones de personas (aproximadamente un 20% de la población mundial) no disponen de acceso a electricidad; hasta un 40% de la población mundial se basa en la utilización de biomasa de forma ineficiente y, de todos éstos, hasta un 85% vive en zonas rurales aisladas, según datos de la IEA (Agencia Internacional de la Energía, por sus siglas en inglés), y tal como se muestra de forma detallada en la Tabla 1 [1]. Además, las Naciones Unidas señalan que hasta 1000 millones más viven con el uso de redes eléctricas poco fiables [2].

TABLA 1. ACCESO A LA ENERGÍA EN MILLONES DE PERSONAS (FUENTE: ADAPTADO DE [1])

	Sin acceso a electricidad		Uso tradicional de la biomasa	
	Población	Porcentaje sobre el total	Población	Porcentaje sobre el total
Países en desarrollo	1265	24%	2588	49%
África	590	57%	698	68%
Asia	628	18%	1814	51%
Latinoamérica	29	6%	65	14%
Oriente Medio	18	9%	10	5%
Mundo	1267	19%	2588	38%

Aunque a priori el acceso a la energía no es de primera necesidad ni se contempla como tal en los Objetivos del Milenio (ODM) desarrollados por la ONU (en la lucha por combatir la pobreza), sí es cierto que se erige como un motor principal para conseguir los denominados ocho ODM, estableciendo unas bases adecuadas para el desarrollo social y económico de las comunidades [3,4].

Las enormes distancias de la mayoría de emplazamientos rurales a la red eléctrica, así como los altos precios de distribución del combustible a las mismas, hacen que la electrificación rural sea más dificultosa de lo normal. De esta manera, y si son explotadas adecuadamente, las energías renovables poseen un gran potencial para suministrar la energía de las comunidades aisladas, con fuentes autóctonas y tecnologías cada vez más económicas [5]. Una metodología ampliamente utilizada y recomendada es la utilización de sistemas híbridos de energía, combinando tecnologías renovables entre sí o bien con alguna tecnología convencional que le otorgue al sistema mayor fiabilidad [2,6].

La integración de las energías renovables requiere de una planificación adecuada, ya que las tecnologías de conversión, el capital inicial, los requerimientos, la aceptabilidad social e impactos varían según el recurso y la zona concreta. De esta manera, el objetivo principal que ha de cumplirse es la sostenibilidad de los sistemas durante la vida útil de los mismos. Y para ello se requerirá no sólo la participación de la comunidad beneficiaria sino también del resto de entes participativos, como ONG's o planificadores energéticos, de manera que se garanticen: la *sostenibilidad medioambiental*, durante todo el ciclo de vida de los sistemas, la *sostenibilidad social*, garantizando el máximo aprovechamiento por parte de la comunidad, y la *sostenibilidad económica*, ya que al fin y al cabo el escaso poder de inversión y la dificultad para mantener el sistema a lo largo de su vida útil son el principal problema [2]. Un enfoque tecnológico y/o económico exclusivamente de la electrificación rural sería, en el mejor de los casos, insuficiente, ya que es necesario incluir en el planteamiento y en el resto del proceso los diferentes factores sociales y medioambientales que resultan clave en el resultado satisfactorio de los proyectos [6],

para evitar el abandono o desuso de los sistemas energéticos en las diferentes regiones de África, Asia o América Latina, como se ha podido comprobar con el paso del tiempo [2].

Como es obvio, para poder pensar en utilizar nuevas tecnologías u otras convencionales, se debe tener en cuenta primeramente la disponibilidad de los recursos de los cuales se aprovechan las diferentes tecnologías. Los recursos renovables, más dispersos generalmente y repartidos de una forma más homogénea, poseen una mayor facilidad de implantación en las zonas rurales, y una oportunidad de aprovechamiento autóctono e *in situ* de los mismos. Los principales recursos de que se disponen son: **energía solar**, con un potencial bastante mayor que el que posee en Europa, sobre todo en el continente africano, aunque también en Latinoamérica y Asia, debido a la incidencia más perpendicular de los rayos solares; **energía eólica**, cuyos datos de disponibilidad y cantidad de recurso no son muy extensos ni fiables en las zonas rurales de los países en vías de desarrollo, ni en principio igual de importante el recurso como el solar, debido a las zonas geográficas y las características climáticas de la mayoría de emplazamientos rurales. No obstante, las particularidades de cada zona y caso pueden otorgarle cierta importancia a dicho recurso, y ser por tanto una opción más que válida; **energía de la biomasa**, que es sin duda uno de los recursos más abundante (y más ampliamente utilizado de forma directa para obtención de calor) y, que no obstante, se utiliza en su mayor parte de forma ineficiente; **energía hidráulica**, un recurso muy diverso en las zonas rurales y que depende del tipo de flujo de agua del que se trate, su constancia, cantidad, etc. Normalmente es más útil en aplicaciones para grandes consumos, y puede ser de gran importancia en su uso en microrredes o redes mayores [5,2]. Por último, y más allá de los recursos renovables, es importante conocer la situación de los recursos **fósiles** y su disponibilidad en las zonas rurales. El uso de diésel y gasolina principalmente para los equipos electrógenos, que suministran electricidad en estas regiones, depende directamente de los precios de los mismos y su fluctuación y, sobre todo, de las distancias de los centros de consumo, que en algunos casos hacen que se alcancen precios prohibitivos para la distribución de éstos. Al igual que con los recursos fósiles (combustibles), y enlazando con el tema tecnológico, la extensión de las redes eléctricas ya existentes hacia las zonas rurales aisladas (principal método de electrificación rural de las políticas aplicadas en los países en vías en desarrollo) resulta, en ocasiones, imposible debido al altísimo precio de las infraestructuras por las largas distancias y la alta dispersión de los centros de consumo, unido al limitado parque de generación de estos países y la baja fiabilidad de muchas de estas redes [2]. Por ello, y como solución al problema de la electrificación, existen otras tecnologías que pueden adaptarse mejor a los consumos dispersos, escasos en algunas ocasiones, y dificultosos de cubrir de forma tradicional.

Partiendo de los recursos que se han mencionado se puede hablar de las siguientes tecnologías renovables: **solar fotovoltaica**, que es la tecnología renovable sin duda más utilizada para electrificación rural, ya que se puede utilizar de forma poco costosa, sin grandes infraestructuras, con la ventaja de tener una gran modularidad, robustez, bajo mantenimiento, alta fiabilidad, flexibilidad y adaptable perfectamente en sistemas híbridos o de forma individual. Además, se trata de una tecnología madura y de larga vida útil (de los paneles). No obstante, y como desventaja, se puede mencionar su alto coste de inversión, si bien la tendencia es a la bajada de precios. La tecnología de **almacenamiento** va muy unida al uso de la solar fotovoltaica, y de otras tecnologías, y resulta básica para la disposición de energía en las horas en las que se carece de sol (o viento, etc.). Esta tecnología (baterías de plomo-ácido principalmente) se encuentra en un estado de madurez que permite principalmente precios competitivo y alta fiabilidad de los sistemas. Es muy adecuada para su uso en sistemas aislados, si bien posee una vida útil menor (que

varía dependiendo de la tecnología y las condiciones de operación, desde pocos años hasta casos donde la mayor parte del tiempo están en flotación, que pueden durar 15 o más años) y requiere de un mantenimiento adecuado, aunque no especialmente complejo; la energía **solar térmica**, principalmente la de baja temperatura, ya que las de alta temperatura y uso en generación eléctrica son normalmente tecnologías más novedosas y de costes mayores y no adaptadas a su uso en estas zonas rurales, se aplican desde el uso para ACS hasta tratamiento de aguas, pasando por el uso de tecnologías simples para cocinar, o incluso su uso en el secado de productos de cultivo u otras aplicaciones; en cuanto a la **energía eólica**, si bien en un principio existe una barrera tecnológica mayor debido a la existencia de partes móviles y la utilización de sistemas electrónicos más avanzados, también es cierto que actualmente existen tecnologías más adecuadas para pequeñas aplicaciones en zonas rurales, que ha hecho que se desarrollen aerogeneradores que en principio son menos eficientes para su uso en parques eólicos de cierta envergadura, como lo son los de eje vertical o incluso los multipala, para aplicaciones tales como bombeo de agua; las tecnologías de uso de la **biomasa** son de especial importancia debido al amplio uso del recurso en estas regiones (Tabla 1) y es especialmente importante garantizar el uso eficiente y libre de emisiones dañinas de esta tecnología, con el uso de cocinas de biomasa mejoradas, producción de gas a través de biodigestores, de biocombustibles a través del uso de cultivos, etc. No obstante, el uso de la biomasa, en algunas de sus formas, puede ocasionar riesgos asociados al uso del suelo, a la competición de los cultivos con la industria alimentaria, a la biodiversidad de las regiones, etc. [2]; el uso de **centrales microhidroeléctricas**, con potencia menores de 20 kW, pueden ser una ventaja cuando existe el recurso adecuado y permiten la producción 24 horas al día. No obstante, esta tecnología es más sofisticada y difícil de diseñar y requiere de un sistema de distribución de electricidad, ya que los centros de consumos se suelen encontrar algo alejados de la producción [2]. Requiere además un conocimiento en profundidad del recurso a aprovechar, de la zona geográfica, de las cargas a abastecer, etc. [7].

A parte de las tecnologías renovables es de especial importancia tener en cuenta algunas tecnologías más convencionales, y que se aprovechan de recursos fósiles, que permitirán, en su uso conjunto con las anteriores, conseguir sistemas más fiables y capaces de suministrar la energía demandada. En este aspecto, las tecnologías más importantes para las aplicaciones rurales son principalmente los **grupos electrógenos diésel** y los **grupos electrógenos de gasolina**. Los primeros son los más ampliamente utilizados, poseen una gran madurez tecnológica, una alta fiabilidad y un bajo coste de inversión, recayendo el peso de la barrera tecnológica en los precios y la disponibilidad del combustible. En cuanto a los segundos, su uso es mayoritariamente como sistemas de *back up* debido a la posibilidad de adquisición de equipos de menor potencia que los diésel y de menor precio (aunque de menor fiabilidad y vida útil).

El principal **objetivo** es, pues, diseñar sistemas de suministro energético aprovechando las energías renovables, y para ello lo más habitual e inteligente es utilizar sistemas híbridos, utilizando tanto tecnologías renovables como algunas fuentes tradicionales que le otorgan fiabilidad al sistema. Este trabajo se basa en la optimización de dichos sistemas, con el fin de encontrar el mix energético más provechoso para el desarrollo de las comunidades rurales aisladas.

Estado del arte de la optimización de sistemas híbridos de energía para electrificación rural.

A continuación se realiza un repaso de la principal literatura sobre optimización de sistemas híbridos de energía, especialmente orientado a zonas rurales aisladas de países en vías de desarrollo.

En Bekele y Tadesse [8] se realiza el estudio de optimización de sistemas híbridos hidro-FV-eólico con el uso de HOMER para su aplicación en diferentes regiones de Etiopía. El análisis en profundidad de los recursos disponibles es una parte importante de la publicación, para posteriormente realizar una optimización mono-objetivo teniendo en cuenta el coste actual neto (CAN), y si bien menciona la importancia de otros criterios (energía no servida, cambio de vida de los pobres, etc.) no los analiza en detalle. En Sen y Bhattacharyya [9] se estudia la optimización de un sistema híbrido hidro-FV-eólico-biodiésel para su aplicación en la India a través del software HOMER y de la minimización del CAN como único objetivo. Además menciona la importancia de los análisis pre y post optimización y la necesidad de estandarizar éstos. En H. Mondal y Denich [10] se analiza la posibilidad de los sistemas híbridos FV-eólico-diésel para su aplicación en diferentes regiones de Bangladesh, a través de la optimización mediante HOMER, minimizando el CAN e intentando minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero (no hace análisis multi-objetivo). El uso de sistemas híbridos hidro-FV-eólico-biogás junto a la posibilidad de cultivos energéticos se analiza en Kanase-Patil et al. [11] como posible suministro para siete diferentes poblaciones de la India. Para ello se realiza una optimización lineal con el software LINGO, tras lo cual se verifican los resultados con HOMER. Se trata de minimizar el coste de energía ("Levelized Cost Of Energy", LCOE, siglas en inglés) tratando de analizar también la fiabilidad del sistema y la energía no servida. H. Abraha et al. [12] enfoca su estudio en sistemas híbridos FV-eólico-diésel y la minimización del CAN mediante el uso de HOMER. Se trata de sistemas para suministrar electricidad en tres emplazamientos diferentes del norte de Etiopía, y para lo cual realiza un estudio previo amplio de los recursos disponibles, detallando la metodología utilizada. Kenfack et al. [13] optimizan sistemas híbridos hidro-FV-diésel para su aplicación en una villa de Camerún, con el uso de HOMER y minimizando, al igual que los anteriores, el CAN. Además concluye con la importancia de realizar análisis de sensibilidad de los principales factores (precio combustible, costes de tecnología, etc.) para ver la aplicabilidad de estos sistemas en otras regiones y para otras necesidades. Otro caso de análisis mono-objetivo se presenta también en Khelif et al. [14], donde se desarrolla un modelo matemático para la optimización del sistema híbrido FV-diésel para su aplicación en una planta energética de Argelia. Principalmente se minimiza el CAN, concluyéndose la importancia de la sensibilidad del sistema frente al precio del combustible. El estudio realizado por A. Torcal et al. [15] se basa en la herramienta iHOGA, y minimiza de nuevo el CAN principalmente, exponiendo como casos de estudio aplicaciones en África. Aquí se descubre la dificultad de incluir energía eólica en algunas aplicaciones, y más en África, debido a su alto coste energético. Una publicación algo diferente es el estudio de S. Hossan et al. [16], donde no sólo se analiza la optimización de un sistema híbrido hidro-FV-diésel sino que también se realiza un modelado del funcionamiento del sistema. Este análisis se orientó a una región de Bangladesh y la minimización del CAN se realizó mediante el uso de HOMER.

Si bien es cierto que la mayoría de estudios y herramientas desarrolladas tienen el objetivo de realizar optimizaciones mono-objetivo, actualmente se busca el desarrollo de herramientas de optimización multi-objetivo, para dar una mayor flexibilidad en la elección de los sistemas, para aplicaciones que se vuelven complejas. Cuando se analizan varios objetivos al mismo tiempo es usual que existan conflictos entre los mismos, dificultando el resultado óptimo final.

En Dufo-López y Bernal-Agustín [17] se presenta un estudio de optimización de tres objetivos —coste (CAN), emisiones y energía no servida— para sistemas híbridos aislados, concretados en un caso de estudio en Zaragoza. El sistema híbrido consta de tecnología fotovoltaica, eólica, diésel, hidrógeno y baterías, utilizando la optimización multi-objetivo con algoritmos evolutivos (MOEA). Dufo-López et al. [18] estudiaron la aplicación del software HOGA para realizar la optimización multi-objetivo (LCOE y emisiones en el ciclo de vida, “Life Cycle Emissions”, LCE) de sistemas híbridos FV-eólico-diésel con uso de baterías incluido. Como caso de estudio se utiliza una aplicación ficticia situada en Zaragoza. En este artículo se realiza una revisión en profundidad sobre los datos de emisiones durante el ciclo de vida de las diferentes tecnologías. Bernal-Agustín y Dufo-López [19] presentan el estudio de optimización multi-objetivo de sistemas híbridos FV-eólico-diésel con baterías, buscando la minimización del CAN así como de la energía no servida. De nuevo el caso de estudio es una carga ficticia en Zaragoza. Por último, otro caso de análisis multi-objetivo se presenta en Pelet et al. [20], donde se utiliza un MOEA para minimizar el coste (CAN) y las emisiones de un sistema aislado, que es una red de la que se alimentan tres hoteles y una ciudad en el Sahara tunecino, tanto suministro térmico como eléctrico. El sistema consiste en paneles fotovoltaicos, generadores diésel, paneles termosolares, un acumulador de agua caliente y una torre de refrigeración.

2. OPTIMIZACIÓN MONO-OBJETIVO Y MULTI-OBJETIVO

Con la elección de utilizar sistemas híbridos de energía para suministrar la electricidad surge el problema de diseñarlos y, por tanto, decidir qué tecnologías utilizar, cuánta potencia ha de tener cada una, cuál es la estrategia de control adecuada en caso de utilizar almacenamiento de energía, etc. Estos sistemas pueden ser bien sistemas individuales o bien microrredes, que incluyen una red de distribución de la electricidad, que puede ser en DC o en AC o incluso sistemas mixtos [21].

Para ello, numerosos estudios y publicaciones han investigado la posibilidad de optimizar dichos sistemas, de manera que la elección de diseño sea la más provechosa. Con tal fin, lo más común fue la búsqueda de una optimización económica, como se ha comprobado en la literatura, ya sea minimizando el coste actual neto o el coste de la energía. Además, normalmente se incluyen en estos estudios ciertas restricciones de otros parámetros, como por ejemplo la energía no servida, es decir, limitar la cantidad de energía que no será cubierta por el sistema en un período de tiempo [22].

La optimización se encarga de encontrar y resolver las incógnitas de una función matemática a través de la minimización o la maximización de la misma, con la posibilidad de estar sujeta ésta a una serie de restricciones. En el presente trabajo se estudian métodos de optimización combinatoria, ya que algunas de las variables son discretas. A pesar del nombre, la optimización no trata siempre de buscar la mejor solución a un problema ya que, en ocasiones, según el tipo de problema puede que sea imposible encontrarla en un tiempo computacional adecuado, y por tanto se busca obtener soluciones razonables, aunque no óptimas. De ahí surge la diferencia entre los métodos tradicionales (programación lineal, multiplicadores de Lagrange, etc.), que buscan óptimos globales y los métodos aproximativos (métodos heurísticos, redes neuronales, etc.), que buscan soluciones aproximadas, debido a la complejidad de problema y la imposibilidad de utilizar los métodos tradicionales [23].

Los métodos heurísticos son procedimientos que alcanzan soluciones adecuadas, aunque no necesariamente óptimas, para problemas complejos y de una forma rápida. La

meta-heurística son generalizaciones de la heurística que facilitan usar los métodos en aplicaciones muy diversas. La forma más común de clasificar la meta-heurística es diferenciando entre métodos de trayectoria y métodos basados en poblaciones, entre los que se encuentran los algoritmos evolutivos, en los que se basa el software iHOGA, que será el utilizado en este estudio, y que buscan principalmente una población de soluciones que va evolucionando en un número de iteraciones hasta alcanzar la condición que se haya impuesto [23].

Hasta la fecha, y como se muestra en la literatura revisada, la mayoría de métodos de optimización se utilizan para resolver aplicaciones con un solo objetivo, si bien es cierto que más recientemente ha surgido la necesidad de resolver casos de optimización con dos o más objetivos diferenciados, que a menudo están en conflicto entre ellos [23,24]. La optimización multi-objetivo permite tomar una decisión basada en obtener los mayores beneficios en cuanto a varios objetivos y priorizar sobre los más interesantes, y se ha convertido actualmente en una metodología interesante debido a que los problemas ingenieriles actuales buscan no solo minimizar costes, sino también maximizar la fiabilidad de los sistemas, el rendimiento, etc. [24]

Existen dos maneras principales de abordar la optimización multi-objetivo, una a través de la combinación de diferentes objetivos individuales para formar un objetivo único que los tenga en cuenta y la otra basada en métodos de optimización que utilizan optimalidad de Pareto. En estos métodos de optimalidad de Pareto, se desean optimizar varios objetivos que no son comparables y sobre los cuales no se puede o sabe priorizar, de tal manera que en esta situación se declara una solución como óptimo de Pareto siempre que no sea dominada por otras soluciones en el espacio de soluciones, es decir, que una solución que es óptimo de Pareto no puede mejorarse respecto a ningún objetivo sin al menos ser empeorada con respecto a otro. De esta manera, el conjunto de todas las soluciones posibles y que son óptimos de Pareto forman el denominado Frente de Pareto, que es el conjunto de valores de las funciones objetivo en el espacio de soluciones óptimas de Pareto. El objetivo final de la optimización es buscar las soluciones en el conjunto de óptimos de Pareto, aunque encontrar ese conjunto de soluciones es muy complicado en muchos de los casos, por lo que el objetivo real será el estudio de un conjunto de soluciones que se acerquen lo más posible al conjunto de óptimos de Pareto [24]. Todo ello se muestra en la Figura 1.

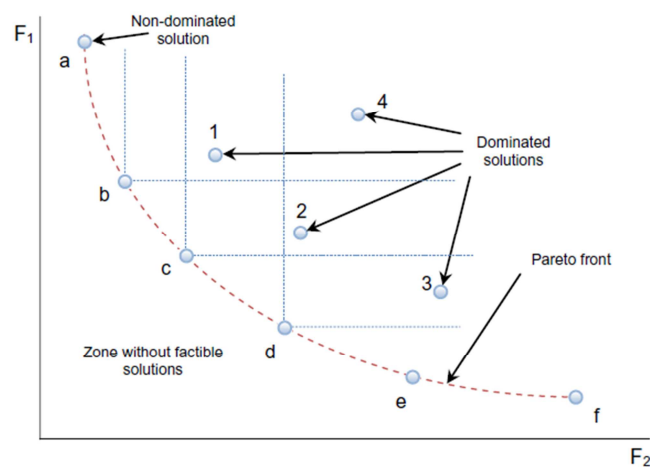


FIGURA 1. FRENTES DE PARETO DE LA OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO (FUENTE: [18]).

Además de parecerse lo máximo posible al verdadero frente de Pareto, las soluciones del frente de Pareto obtenido han de ser diversas y distribuidas a lo largo del frente de Pareto, de manera que existan posibilidades suficientes para la elección de las soluciones y a su vez ha de capturar todo el espectro de soluciones del frente de Pareto real.

La herramienta informática utilizada en este estudio es iHOGA, un software desarrollado por el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza, ya que es un software que permite, a través de una optimización que utiliza algoritmos genéticos, optimizar los sistemas tanto de forma mono-objetivo como multi-objetivo, permitiendo el uso (en los sistemas híbridos a optimizar) de múltiples tecnologías (fotovoltaica, eólica, baterías, generadores AC, hidrógeno, energía hidráulica, etc.) además de la inclusión de diferentes objetivos económicos, medioambientales, técnicos e incluso sociales. Además de la posibilidad de utilizar algoritmos genéticos, el software iHOGA permite utilizar métodos enumerativos, al igual que hace HOMER, de manera que se pueden evaluar todas las posibilidades y alcanzar el óptimo real, siempre y cuando los casos posibles sean suficientemente pocos, para evitar tiempos computacionales inviables. Por último, no solo se puede optimizar el diseño del sistema híbrido sino también la estrategia de control [25].

El principal objetivo de este estudio es la comparación de la optimización mono-objetivo y la optimización multi-objetivo y, dentro de ésta, del análisis de los diferentes objetivos y cómo esto afecta a las soluciones encontradas. Por ello es muy importante hablar sobre los diferentes objetivos que incluye el software y que se van a estudiar en este trabajo, de manera que queden bien definidos y sea comprensible el análisis de los resultados.

Costes totales

La función de coste es lo que se denomina coste actual neto (CAN o VAN), lo que incluye tanto la inversión inicial como los valores actualizados referentes a todos los costes durante la vida de las instalaciones. La vida de los sistemas se suele considerar la de los paneles fotovoltaicos, ya que es la tecnología de mayor vida. En general, los costes, de una forma más detallada, que se incluyen en esta función de costes, son:

- Coste de adquisición de paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, baterías, inversores, reguladores de carga, generadores diésel, etc.
- Coste de mantenimiento de los diferentes componentes de los sistemas.
- Coste de reemplazamiento de los diferentes componentes durante la vida del sistema.
- Costes de operación y mantenimiento de los componentes durante la vida del sistema.
- Costes de consumo de combustibles durante la vida de los sistemas.

Además, hay que tener en cuenta que los costes dependerán en cierta manera también de las estrategias de control seleccionadas. Se considera que al final de la vida del sistema el valor remanente de los diferentes elementos es recuperado [17].

Emisiones equivalentes de CO₂

Aquí se calculan no solamente las emisiones por consumo de combustible de los generadores diésel, con su equivalente en emisiones de CO₂ (kg de CO₂) de las emisiones de gases de efecto invernadero [17], sino también las emisiones que se producen a lo largo

de la vida de las diferentes tecnologías, incluyendo las emisiones que se producen en la fabricación de las tecnologías, el transporte de los componentes, el reciclaje de las plantas y el fin de vida de los sistemas, es decir, se debe partir de datos sobre el análisis de ciclo de vida de los diferentes elementos [18].

Energía no servida

La función objetivo de energía no servida está definida a partir de la cantidad de energía no suministrada, y por tanto no cubierta del consumo, al sistema a lo largo de un año, y se mide en kWh/año. El porcentaje de energía no servida se calcula a través de la Ecuación 1.

ECUACIÓN 1

$$ENS (\%) = \frac{ENS \left(\frac{kWh}{año} \right)}{Carga\ anual\ total \left(\frac{kWh}{año} \right)} \times 100$$

La energía no servida, aparte de considerarse en este estudio como un objetivo a minimizar, se suele considerar como una restricción, es decir, se puede y suele establecerse un valor máximo de energía no servida al sistema, para evitar un diseño que no satisfaga las necesidades requeridas [17].

Creación de empleo

Este indicador se refiere a los puestos de trabajo, directos e indirectos, que se podrían crear (para una persona durante un año) con la construcción, operación y desmantelamiento de los sistemas de suministro eléctrico. Los empleos directos se refieren a todos los creados en el diseño, fabricación, construcción e instalación, gestión, mantenimiento, etc. Mientras, los indirectos se refieren a los creados a partir del efecto proveedor, es decir, todos los relacionados con el suministro de materiales, piezas, equipos, etc. Por último, el empleo inducido es aquel que se genera a raíz de la actividad económica consecuencia del suministro eléctrico.

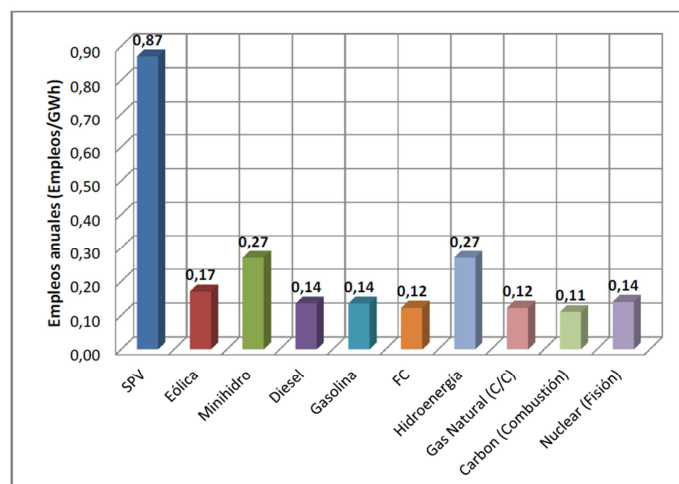


FIGURA 2. FACTORES DE CREACIÓN DE EMPLEO PARA DIFERENTES TECNOLOGÍAS (FUENTE: [26]).

La creación de empleo mediante sistemas descentralizados, en los que se focaliza este trabajo, se define mediante la Ecuación 2 [26].

$$CE_{sistema} = \sum_{i=1}^n X_i \times FCE_i$$

Donde:

$CE_{sistema}$: Puestos de trabajo potencialmente creados por el sistema de generación para el año de diseño (empleos/año); X_i : Energía producida por la tecnología i (kWh/año); FCE_i : Factor de creación de empleo de la tecnología i (empleos/kWh);

En la Figura 2 se muestra la información sobre la creación de empleo debido a las diferentes tecnologías, que se medirá en este caso en empleos/GWh consumidos por tecnología, ya que se refiere a los factores de creación de empleo (FCE).

Índice de Desarrollo Humano (IDH)

Como se ha comentado, el acceso a la energía es básico para conseguir cubrir las necesidades básicas sociales y para impulsar el desarrollo propio de las comunidades y en definitiva el desarrollo humano. La energía tiene, pues, un efecto sobre la productividad, la salud, el acceso a agua potable y a los servicios de comunicación. De esta manera recientemente ha surgido el interés de relacionar más directamente el acceso a la energía y el desarrollo humano.

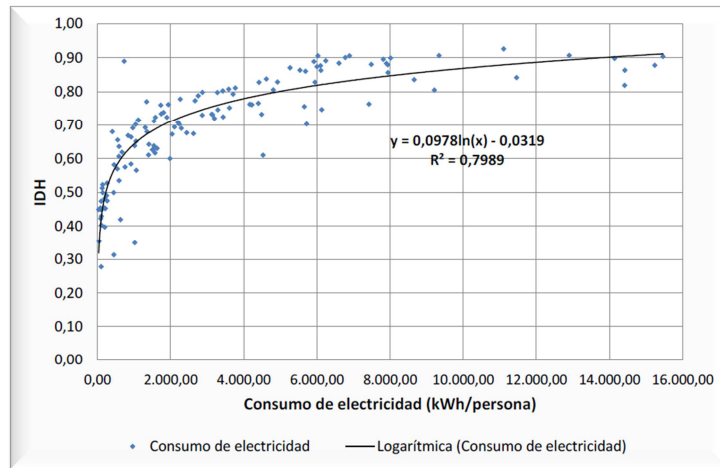


FIGURA 3. RELACIÓN ENTRE IDH Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, 2009 (FUENTE: [26]).

El Índice de Desarrollo Humano fue creado por el programa de Naciones Unidas para el desarrollo (UNDP, por las siglas en inglés) y mide el nivel de desarrollo humano de un país o región evaluando lo cerca que están sus habitantes de un nivel de vida ideal, y se mide en una escala de 0 a 1. A través de la información de diferentes estudios y de los análisis de UNPD sobre diferentes países, se establece una ecuación para la estimación de tal indicador (Ecuación 3) y se elabora una figura a partir de dichos datos (Figura 3) [26]:

$$IDH_{poblado} = 0.0978 \times LN \left[\frac{ETD_{poblado} - ENS_{sistema}}{NP_{poblado}} \right] - 0.0319$$

Donde:

IDH_{poblado}: Índice Desarrollo Humano del poblado para el año de diseño (%); ETD_{poblado}: Energía total disponible en el poblado (kWh/año); ENS_{sistema}: Energía total no servida por el sistema (kWh/año); NP_{poblado}: Población total para el año de diseño (personas)

3. DEFINICIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

3.1. Suministro eléctrico en Taba (Dejen, Etiopía).

Este caso se basa en la información extraída de Bekele y Tadesse [8].

La localidad de Taba (Distrito de Dejen, Etiopía) basa su uso energético en lámparas de queroseno, generación diésel para algunas aplicaciones productivas y bombeo de agua, uso de biomasa forestal para cocinar y baterías secas para su uso en radios y otros dispositivos electrónicos. Se pretende obtener un sistema de suministro más limpio, fácil de manejar y respetuoso con el medio ambiente. Se trata de una comunidad de alrededor de 63.000 personas sin acceso a electricidad, con una extensión de aproximadamente 93.963 km² y localizada en las coordenadas: Latitud 10°12'25,68"N y Longitud 38°3'3,00"E. Se asumen un total de 10.500 familias aproximadamente (una media de seis miembros por familia), un total de 25 escuelas primarias (una por cada 420 familias), y 25 centros sanitarios. Además se tendrán en cuenta los usos productivos de la comunidad, siendo el principal el uso de varios molinos de grano. Hay que tener en cuenta que estos datos son para toda la comunidad, es decir, teniendo en cuenta las diferentes localidades, mientras que este estudio está centrado en la localidad concreta de Taba, que según Bekele y Tadesse [8], concentra el 3.45 % del consumo y de las necesidades totales de toda la comunidad.

Recursos energéticos disponibles

En cuanto a la **irradiación solar**, la información que requiere iHOGA es un perfil horario de radiación, a través de la importación desde fichero, o bien datos solares medios mensuales, ya sean de irradiación media (kWh/m²) o incluso de horas solares medias diarias, lo cual se puede obtener a partir de dos estaciones de medida cercanas a la localización [8].

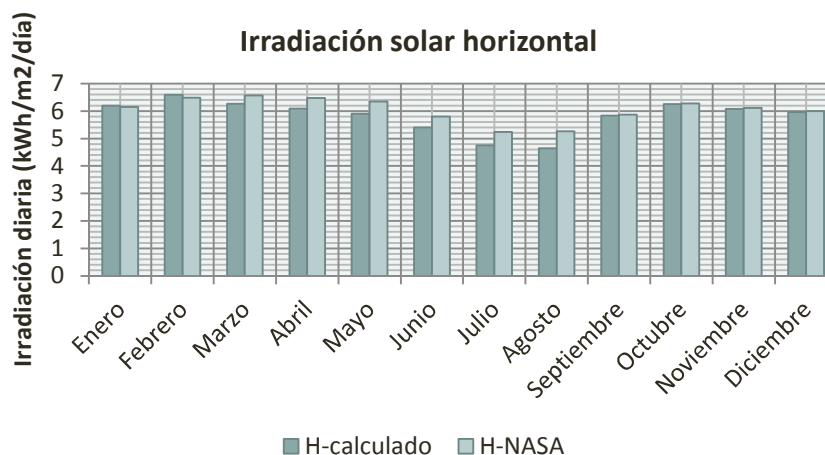


FIGURA 4. IRRADIACIÓN SOLAR MENSUAL EN TABA

Otra forma alternativa es extraer los datos de las bases de datos de la web NASA *Surface Meteorology and Solar Energy*, utilizando las coordenadas descritas previamente. La comparación se puede ver en la Figura 4. Se selecciona el perfil denotado como H-calculado, que es el obtenido a través de las horas de sol diarias de las estaciones cercanas.

Si hablamos de **recurso eólico**, se dispone de datos de la velocidad del viento de una estación cercana (Debre Markos), que se calculó de 3.5 m/s de velocidad media anual a 10 m de altura. Los datos de la NASA para la localización exacta del sistema es de 3.1 m/s velocidad media anual. Debido a que la superficie en la localización geográfica del sistema, Taba, es diferente a la de la estación de la que se obtuvieron los datos (Debre Markos), y para evitar sobreestimar el recurso, se tomarán como datos los extraídos de la web de la NASA [8].



FIGURA 5. RECURSO EÓLICOA DISPONIBLE A 10 M EN TABA.

Para disponer de un perfil horario de viento, habrá que estimar dichos valores horarios de velocidad del viento para todo un año, lo cual iHOGA realiza mediante el método descrito en Dufo-López y Bernal-Agustín [27]. Para ello se toman, además de los valores de velocidad media mensuales (Figura 5), los factores necesarios para la distribución de Weibull: parámetro de forma, $k=2$ [8] y factor de correlación, $fc=0.9$ [27].

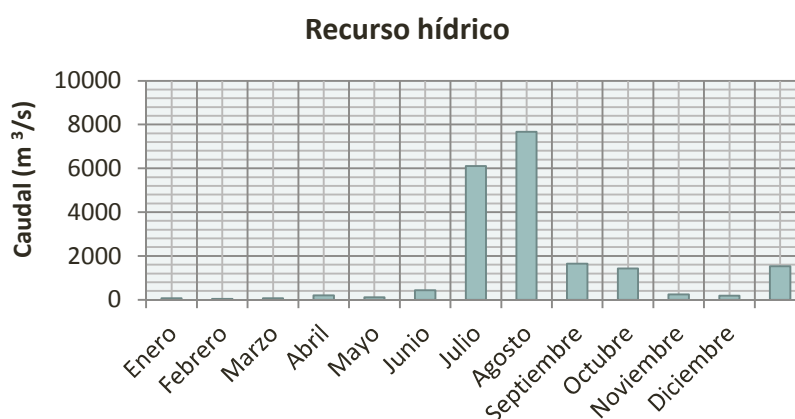


FIGURA 6. RECURSO HÍDRICO DISPONIBLE EN TABA.

Por último, el **recurso hídrico**, debido a la existencia de un curso fluvial cercano a la localización del sistema, requiere de la medición de la altura del salto del curso de agua así como del caudal mensual medio, ya que se pretende aprovechar el recurso con

centrales de agua fluyente [8]. La altura del salto en Taba es de 62 m, mientras que los caudales mensuales medios estimados son los que se muestran en la Figura 6 [8].

Cabe mencionar que el recurso hídrico es enorme, pero en el presente trabajo tan solo se pretende aprovechar una pequeña parte, estableciendo las bases para la utilización de otros sistemas en la misma región.

Para más detalles sobre los recursos y sus datos de entrada en iHOGA acudir a Anexo I.

Estudio del consumo

De acuerdo a Bekele y Tadese [8], el consumo estimado de este tipo de comunidades se basa en cargas básicas para viviendas, con televisor, radio, luz y cocina, cargas comunitarias, como los centros sanitarios y las escuelas primarias y algunos consumos productivos (molinos de grano). Los detalles de los consumos se muestran en el Anexo I. Cabe mencionar que además será interesante analizar la posibilidad de incrementar el perfil de consumo, de manera que se facilite el desarrollo de las comunidades, y nos permita analizar que ocurre cuando existe la posibilidad de aumentar el IDH.

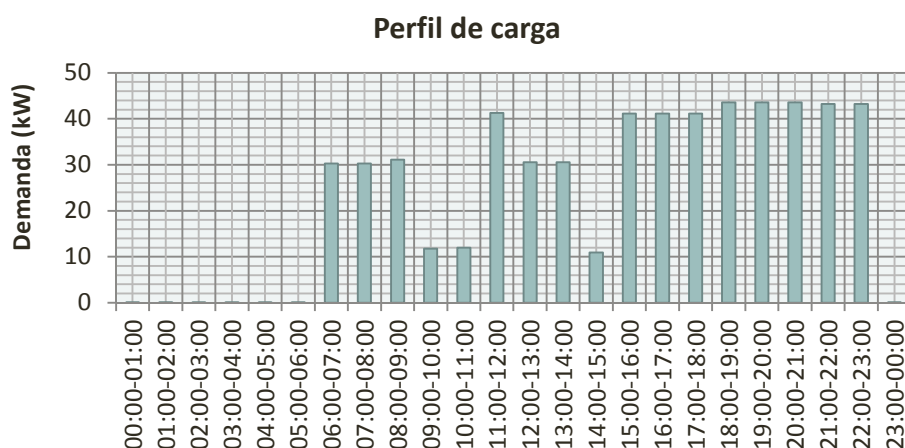


FIGURA 7. PERFIL DE CARGA DIARIA EN TABA

Se identifica un perfil de carga básico (Figura 7), y a partir de él se establecen dos perfiles más, ya que se tendrá en cuenta un decrecimiento de la carga de un 15 % en los meses de Junio y Septiembre, así como de un 30 % en los meses de Julio y Agosto [8].

Tecnologías aplicables.

Se recogen en la Tabla 2 los principales datos sobre las tecnologías que se han utilizado en el presente caso de estudio. Se puede encontrar información en detalle en el Anexo I.

El resto de datos de entrada a iHOGA (incluidos los datos económicos y más detalles sobre lo comentado anteriormente) se especifican en el Anexo I.

TABLA 2. DATOS SOBRE LAS TECNOLOGÍAS SELECCIONADAS (TABA).

	Fotovoltaica	Eólica	Gen. Diésel	Baterías	Hidráulica	Inversor
Tamaño	1.5 kW	14.7, 26.9, 43.1 y 72.5 kW	20 kVA	1610 Ah	30 kW	50 kVA
Inversión (€)	2900	14000, 22000, 34000 y 59000.	7300	582	2700	38000
Coste de reemplazamiento (€)	-	9500, 17000, 26000 y 48000.	7300	582	-	38000
Coste de O & M	200 €/año + 32 €/año/unidad	280, 440, 680 y 1180 €/año	0.32 €/h + 0.624 €/l	5.82 €/año/unidad + 200 €/año	1800 €/año	-
Creación de empleo (empleados/GWh consumido)	0.87	0.17	0.14	-	0.27	-
Emisiones en ciclo de vida	1392 kgCO ₂ eq/kWh	4000, 8000, 12000 y 20000 kgCO ₂ eq/kWh	215 kgCO ₂ eq/kWh + 3.5 kgCO ₂ /l	55.3 kgCO ₂ eq/kWh capacidad	5 gCO ₂ eq/kWh generado	-
Vida útil	25 años	20 años	10 000 horas	Según profundidad de descarga	30 años	10 años

3.2. Suministro eléctrico en Palari (Chhattisgarh, India)

Este caso se basa en el estudio realizado en Sen y Bhattacharyya [9].

Se trata de un estudio de electrificación rural de Palari, un pequeño poblado en el distrito de Bastar, en el estado indio de Chhattisgarh, cuyos datos principales se recogen en la Tabla 3.

TABLA 3. DATOS SOBRE EL POBLADO SELECCIONADO (FUENTE: ADAPTADO DE [9]).

	Detalles
Nombre de poblado (Sub-distrito, distrito)	Palari (Kondagaon, Bastar)
Estado (País)	Chhattisgarh (India)
Latitud	21° 33' N
Longitud	82° 10' E
Elevación sobre nivel del mar(m)	587
Superficie total (hectáreas)	370
Número de hogares	304
Población total	1624
Escuelas primarias	1
Centros médicos	1

Recursos energéticos disponibles

La **irradiación solar** se estima a partir de los valores mensuales extraídos de la web de la NASA, y que se muestran en la Figura 8.

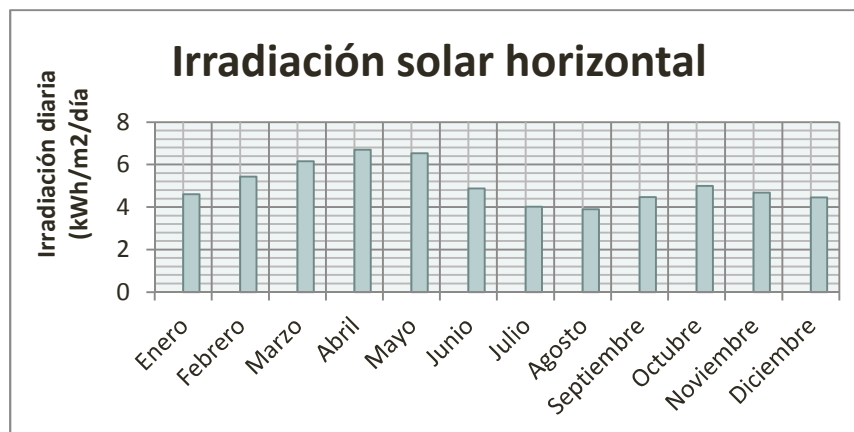


FIGURA 8. IRRADIACIÓN SOLAR MENSUAL EN PALARI.

El **recurso eólico** se estima de forma horaria de la misma forma que en el caso anterior. Para ello se extraen los datos medios mensuales de velocidad del viento (Figura 9), así como se establecen los parámetros de Weibull: $k = 2$ [25] y $fc = 0.85$ [9].

Para más detalles sobre los recursos renovables disponibles consúltese el Anexo I.

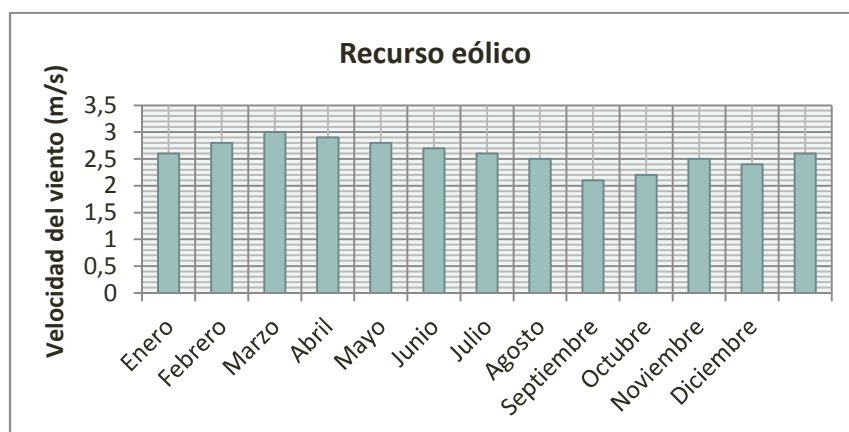


FIGURA 9. RECURSO EÓLICO DISPONIBLE A 10 M EN PALARI.

Estudio del consumo

De acuerdo a lo establecido en Sen y Bhattacharyya [9], la electricidad, en estas zonas rurales, es demandada para usos domésticos (radio, ventiladores, luces, etc.), para usos agrícolas (bombeo e irrigación), actividades comunitarias (escuelas, centros médicos, etc.) y pequeña actividad empresarial o productiva (almacenamiento en frío, plantas de procesado, etc.). La demanda de Palari se ha establecido de forma diferenciada para dos temporadas principales del año, lo que denominaremos verano (Abril-Octubre) e invierno (Noviembre-Marzo). En la figura se muestra el perfil de verano, mientras se pueden encontrar más detalles sobre las cargas y las características de los perfiles en el Anexo I.

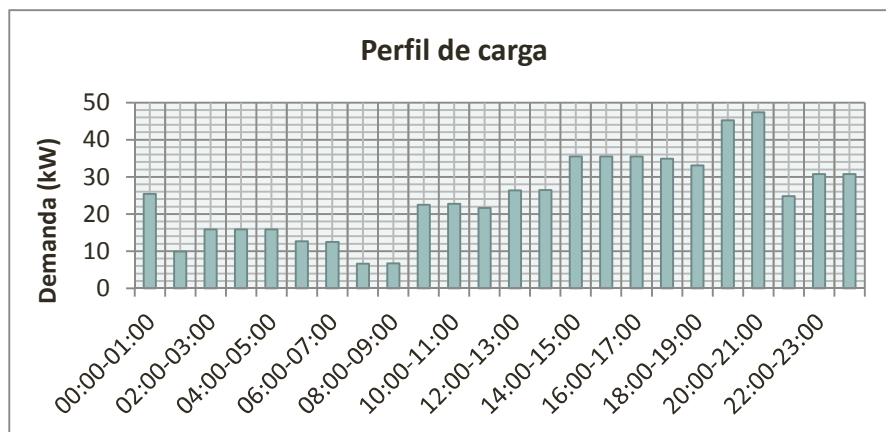


FIGURA 10. PERFIL DE CARGA DIARIA DE VERANO EN PALARI.

Tecnologías aplicables.

La Tabla 4 presenta las principales características y datos de entrada de las tecnologías seleccionadas. Para más información acudir al Anexo I.

TABLA 4. DATOS SOBRE TECNOLOGÍAS SELECCIONADAS (PALARI).

	Fotovoltaica	Eólica	Gen. Diésel	Baterías	Inversor
Tamaño	1 kW	14.7, 26.9 y 43.1 kW.	5.5, 10, 15 y 20 kVA	1370 Ah	50 kVA
Inversión (€)	1100	14000, 22000 y 34000.	1300, 3700, 5750 y 7300	492	38000
Coste de reemplazamiento (€)	-	9500, 17000 y 26000.	1300, 3700, 5750 y 7300	492	38000
Coste de O & M	200 €/año + 11 €/año/unidad	280, 440 y 680 €/año	0.22 €/h (0.27 ó 0.3 ó 0.32 respectivamente) + 0.74 €/l	4.92 €/año/unidad + 200 €/año	-
Creación de empleo (empleados/GWh consumido)	0.87	0.17	0.14	-	-
Emisiones en ciclo de vida	1392 kgCO ₂ eq/kWp	4000, 8000 y 12000 kgCO ₂ eq/kW	215 kgCO ₂ eq/kWp + 3.5 kgCO ₂ /l	55.3 kgCO ₂ eq/kWh capacidad	-
Vida útil	25 años	20 años	10 000 horas	Según profundidad descarga	10 años

El resto de datos de entrada a iHOGA (incluidos los datos económicos y más detalles sobre lo comentado anteriormente) se especifican en el Anexo I.

4. RESULTADOS

4.1. Suministro eléctrico en Taba (Dejen, Etiopía).

Optimización mono-objetivo (minimizar coste).

Al realizar la optimización minimizando el coste total neto actualizado (CAN o VAN) como único objetivo se calcula como mejor solución la que se muestra en la Tabla 5,

con un valor de VAN de 418968.75 € y un coste de energía de 0.09 €/kWh. La selección de tecnologías es la que se muestra en la Tabla 6. Como se puede observar, para este caso no se introduce la energía eólica en el resultado óptimo, debido principalmente al gran recurso hídrico, a lo económico que resultan la tecnologías hidroeléctrica y solar fotovoltaica y al bajo recurso eólico. Cabe mencionar que el precio de la microhidroeléctrica es el de la turbina, sin incorporar la obra civil, ya que en principio el recurso es enorme y el posible precio de esa obra se habría de asumir por toda la comunidad, ya que recordemos que existe más necesidad de suministro eléctrico en la zona (recordemos que el poblado de Taba sólo representaba un pequeño porcentaje del consumo total de la comunidad). Aun así el precio y disponibilidad de recurso solar hacen que la eólica quede bastante fuera de las posibilidades.

TABLA 5. RESULTADOS OPTIMIZACIÓN MONO-OBJETIVO (TABA).

Nº	Coste (VAN) (€)	Em.CO2 (kg/año)	ENS (kWh/año)	ENS (%)	Fracc. Ren. (%)	Coste E (€/kWh)	IDH	Empleos
0	418968.75	7342.26	700.62	0.36	98.45	0.09	0.4061	2.06

TABLA 6. COMPONENTES RESULTADO DE OPTIMIZACIÓN MONO-OBJETIVO (TABA).

P total FV (kWp)	P total eólica (kW)	Turbina Hidro. (kW)	Gener. AC (kVA)	Cap. total Bat. (kWh)
19.5	0.00	30	20	50.23

El VAN del sistema se distribuye como se muestra en la Figura 11, de manera que son las baterías las que suponen cerca de la mitad del coste total actualizado del sistema. El bajo precio del generador diésel (adquisición, reposiciones y combustible) se debe a que es utilizado apenas unos cientos de horas al año, luego actuará más bien como *back up* cuando las energías renovables no puedan cubrir la demanda y las baterías no dispongan de energía.

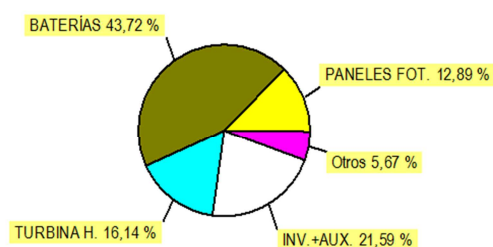


FIGURA 11. COSTE POR COMPONENTES EN OPTIMIZACIÓN MONO-OBJETIVO (TABA).

Asimismo, el balance energético anual del sistema se muestra en la Figura 12, donde se observa como la energía hidráulica cubre la mayor parte de la demanda, que se complementa con el uso de la energía fotovoltaica, apoyadas en última instancia por el generador diésel, que apenas trabaja durante el año. El resultado final está marcado por la gran disponibilidad de recurso hídrico.

En este caso, y aun escogiendo un precio de diésel bastante bajo, debido al gran recurso hídrico y el apoyo de la fotovoltaica, un análisis de sensibilidad del precio del combustible (Tabla 7), si bien tiene sentido debido a la variabilidad del mismo (existencia o no de subsidios) [28], muestra que el uso de generador podría sustituir a la fotovoltaica

solo en caso de grandes subsidios por parte del gobierno, alcanzando precios realmente bajos de diésel.

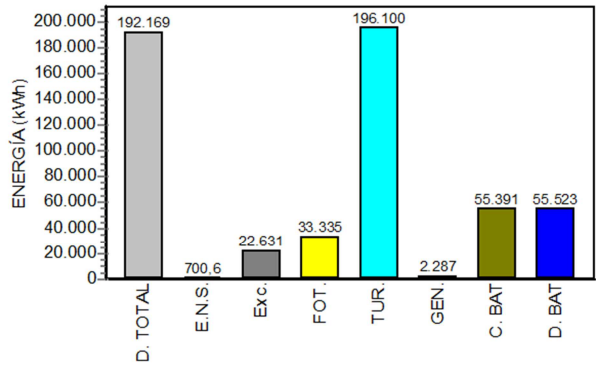


FIGURA 12. BALANCE ENERGÉTICO OPTIMIZACIÓN MONO-OBJETIVO (TABA).

TABLA 7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON RESPECTO AL PRECIO DEL DIÉSEL EN TABA.

Precio diésel (€/l)	Econs (kWh/año)	E.renov (kWh/año)	E.FV (kWh/año)	Eeolica (kWh/año)	Ehidroel (kWh/año)	Eexceso (kWh/año)	Ecarga (kWh/año)	Edesc (kWh/año)	EgenAC (kWh/año)
0.10	192170	196100	0.00	0.00	196100	46261	20869	20824	51340
0.30	192170	229435	33335	0.00	196100	22631	55391	55524	2800
0.624	192170	229435	33335	0.00	196100	22631	55391	55524	2288
0.90	192170	229435	33335	0.00	196100	22631	55391	55524	2288

Optimización multi-objetivo.

Se comienza comentando los resultados obtenidos para algunas optimizaciones más típicas de factores económicos, técnicos y medioambientales, para después incluir los objetivos de carácter social, que es el principal punto novedoso de este trabajo.

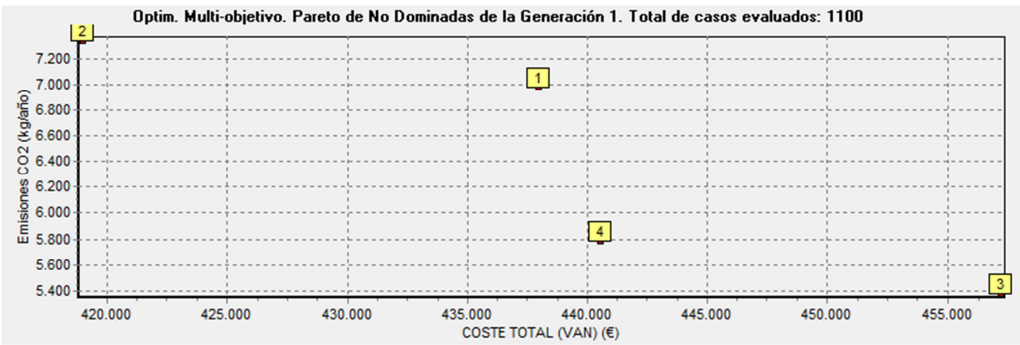


FIGURA 13. FRENTE DE PARETO DE OPTIMIZACIÓN VAN-EMISIONES DE CO₂ (TABA).

Al realizar la optimización atendiendo al doble objetivo VAN-emisiones de CO₂, se puede vislumbrar en la Figura 13 el frente de Pareto obtenido, con un total de cuatro soluciones no dominadas (Tabla 8). Para una reducción del 26% de las emisiones se requiere un aumento del VAN de aproximadamente el 9%, debido principalmente al aumento de capacidad fotovoltaica. Mientras, al ser en estos casos la energía no servida mínima, debido a la restricción impuesta a la entrada de los datos (máximo de Energía no

servida del 1 %), los resultados obtenidos no son realmente novedosos, si bien se pueden consultar en el Anexo II.

TABLA 8. RESULTADOS OPTIMIZACIÓN VAN-EMISIONES DE CO₂ (TABA).

Nº	Coste (VAN) (€)	Em.CO2 (kg/año)	ENS (kWh/año)	ENS (%)	Fracc. Ren. (%)	Coste E (€/kWh)	IDH	Empleos
1	437969.09	6980.85	474.42	0.25	98.76	0.09	0.4062	2.0
2	418968.75	7342.26	700.62	0.36	98.45	0.09	0.4061	2.0
3	457224.97	5376.50	8.41	0.00	99.97	0.10	0.4064	2.7
4	440526.72	5785.61	101.55	0.05	99.69	0.09	0.4064	2.7

Llegados a este punto se incluye en la optimización el objetivo de creación de empleo, de manera que se pretende maximizar los empleos creados a raíz de la implantación del sistema de electrificación rural. No obstante, si lo optimizamos conjuntamente con el VAN, se puede comprobar (Tabla 9) que son objetivos muy conflictivos, ya que como es evidente, los empleos se crean principalmente por un mayor consumo y por sistemas de dimensiones mayores, lo cual exige un coste mayor. Además, debido a las limitaciones en la elección del sistema (turbina hidráulica única, generador único, etc.) es posible que con el fin de crear empleo se estén obteniendo soluciones que puedan hasta duplicar el coste total.

TABLA 9. RESULTADOS OPTIMIZACIÓN VAN-CREACIÓN DE EMPLEO (TABA).

Nº	Coste (VAN) (€)	Em.CO2 (kg/año)	ENS (kWh/año)	ENS (%)	Fracc. Ren. (%)	Coste E (€/kWh)	IDH	Empleos
1	437969.09	6980.85	474.42	0.25	98.76	0.09	0.4062	2.0
2	418968.75	7342.26	700.62	0.36	98.45	0.09	0.4061	2.0
3	457224.97	5376.50	8.41	0.00	99.97	0.10	0.4064	2.7
31	879007.00	13827.02	0.00	0.00	100.00	0.18	0.4064	7.9
32	920869.81	14227.02	0.00	0.00	100.00	0.19	0.4064	8.0
33	825695.38	13298.53	0.00	0.00	100.00	0.17	0.4064	7.9

Para incorporar el último de los objetivos, quizá el más importante para zonas rurales aisladas en vías de desarrollo (ya que indica el estado de desarrollo de las comunidades), se habrá de dar la posibilidad de un incremento considerable del consumo, ya que el Índice de Desarrollo (IDH) y el consumo están directamente relacionados, puesto que se considera que para un buen desarrollo es necesario un mínimo de necesidades que requerirán energía. Por ello, se establece un incremento del 40% sobre el perfil de consumo original, de manera que se impulsen nuevos consumos domésticos más sofisticados, nuevos usos productivos, etc. Es importante establecer un nuevo límite de Energía no servida mucho menos restrictivo, para permitir la fluctuación del consumo, y con ello del IDH.

Como se puede ver (Tabla 10) el incremento del coste es realmente considerable, llegando a ser hasta más del doble del original, para un incremento del IDH realmente pequeño. Esto puede deberse a dos motivos principalmente: el primero es que los consumos originales son realmente básicos, por lo que un aumento del 40 % quede insuficiente; además se le suma que las opciones tecnológicas no son muy amplias y el incremento de las tecnologías renovables (Tabla 11) hace que se obtenga una inversión

muy elevada, y más cuando debido a las características del sistema (tensión de trabajo, inversores, etc.) no se puede refinar la búsqueda.

TABLA 10. RESULTADO OPTIMIZACIÓN VAN-IDH (TABA)

Nº	Coste (VAN) (€)	Em.CO2 (kg/año)	ENS (kWh/año)	ENS (%)	Fracc. Ren. (%)	Coste E (€/kWh)	IDH	Empleos
1	881488.56	51273.47	56950.45	21.17	78.43	0.17	0.4161	4.2
2	871492.56	53389.79	60248.56	22.39	77.34	0.17	0.4145	4.2
3	906992.12	44509.40	40127.52	14.91	84.85	0.16	0.4235	4.2
4	914719.44	43361.03	38018.48	14.13	85.18	0.16	0.4244	4.2
5	932222.75	43100.50	36702.67	13.64	86.34	0.16	0.4250	4.9
6	957451.69	40333.46	30875.58	11.48	88.51	0.16	0.4274	5.0
7	891730.56	46106.73	43202.56	16.06	83.82	0.16	0.4222	4.9
8	959328.44	42897.09	30338.31	11.28	88.72	0.16	0.4276	5.6

TABLA 11. COMPONENTES RESULTADO OPTIMIZACIÓN VAN-IDH (TABA).

Nº	P total FV (kWp)	P total eólica (kW)	Turbina Hidro. (kW)	Gener. AC (kVA)	Cap. total Bat. (kWh)
1	78	14.7	30	20	502.32
2	78	26.9	30	20	502.32
3	78	43.1	30	20	502.32
4	78	0.00	30	20	502.32
5	97.5	14.7	30	20	502.32
6	97.5	43.1	30	20	502.32
7	97.5	0.00	30	20	502.32
8	117	0.00	30	20	502.32

En el Anexo II pueden verse más resultados interesantes, entre ellos el efecto conjunto de la optimización VAN-Creación de empleo-IDH.

4.2. Suministro eléctrico en Palari (Chhattisgarh, India).

Optimización mono-objetivo

Al minimizar el VAN en el caso del sistema de Palari se obtiene un valor de 682035.94 € (Figura 11), que con un valor de consumo anual de 182917 kWh/año (Tabla 14) dan un valor de coste de la energía de 0.15 €/kWh, algo más elevado que el caso anterior, debido principalmente a unos recursos renovables más escasos, principalmente a que no se tiene en cuenta aquí el recurso hídrico, así como el mayor precio del diésel. Esta vez, ya que no existe un recurso hídrico abundante a tener en cuenta, y que el recurso eólico es aún peor que en el caso de Taba, la importancia recaerá en la energía fotovoltaica y la generación diésel (Tabla 13), de manera que se hace muy interesante analizar la sensibilidad de la optimización mono-objetivo frente al precio del combustible (Tabla 14) (también podría hacerse frente al coste de la fotovoltaica). De nuevo, la generación diésel tendría mucha más importancia si los precios fuesen realmente bajos.

TABLA 12. RESULTADO OPTIMIZACIÓN MONO-OJETIVO (PALARI).

Nº	Coste (VAN) (€)	Em.CO2 (kg/año)	ENS (kWh/año)	ENS (%)	Fracc. Ren. (%)	Coste E (€/kWh)	IDH	Empleos
0	682035.94	17563.59	1518.86	0.83	98.32	0.15	0.4293	6.3

TABLA 13. COMPONENTES RESULTADO OPTIMIZACIÓN MONO-OBJETIVO (PALARI).

P total FV (kWp)	P total eólica (kW)	Gener. AC (kVA)	Cap. total Bat. (kWh)
208	14.7	5.5	502.32

TABLA 14. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL SISTEMA CON EL PRECIO DEL DIÉSEL (PALARI).

Precio diésel (€/l)	Econs (kWh/año)	E.renov (kWh/año)	E.FV (kWh/año)	Eeólica (kWh/año)	Eexceso (kWh/año)	Ecarga (kWh/año)	Edesc (kWh/año)	EgenAC (kWh/año)
0.10	182917	201986	201986	0.00	61165	35808	35814	64219
0.30	182917	240511	240511	0.00	33192	65118	65242	43800
0.74	182917	295761	291863	3897	73305	102956	103092	1548
0.90	182917	295761	291863	3897	73305	102956	103092	1548

El balance energético de la solución mono-objetivo se puede ver en la Figura 14, donde se corrobora la importancia de la energía solar fotovoltaica, apoyada principalmente por el almacenamiento en baterías de plomo ácido.

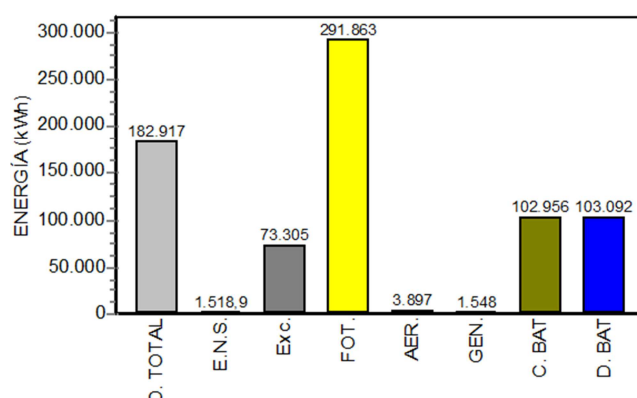


FIGURA 14. BALANCE ENERGÉTICO OPTIMIZACIÓN MONO-OBJETIVO (PALARI).

Optimización multi-objetivo

Al igual que en el caso de Taba, comenzamos realizando una optimización de doble objetivo VAN-Emissiones de CO₂ (Tabla 15). Se puede observar como en este caso la reducción de emisiones posible es menor al caso de Taba.

Como anteriormente, debido a las grandes restricciones de Energía no servida, los resultados de optimización VAN-Energía no servida y del triple objetivo VAN-Emissiones de CO₂-Energía no servida no ofrecen una solución sustancialmente diferente a las anteriores, si bien se especifican los resultados en el Anexo II.

TABLA 15. RESULTADO DE OPTIMIZACIÓN VAN-EMISIONES DE CO2

Nº	Coste (VAN) (€)	Em.CO2 (kg/año)	ENS (kWh/año)	ENS (%)	Fracc. Ren. (%)	Coste E (€/kWh)	IDH	Empleos
1	655236.38	18762.73	5198.67	2.84	94.96	0.15	0.4273	5.9
2	666535.88	18643.01	4700.59	2.57	95.39	0.15	0.4276	5.9
3	638368.44	18981.83	6139.57	3.36	94.29	0.14	0.4268	5.8
4	682035.94	17563.59	1518.86	0.83	98.32	0.15	0.4293	6.3
5	692038.50	17363.64	1213.45	0.66	98.65	0.15	0.4295	6.3
6	709267.56	17269.37	1030.70	0.56	98.85	0.16	0.4296	6.3
7	671040.81	17820.97	2025.15	1.11	97.88	0.15	0.4290	6.3

Este es el momento en que se incluyen los objetivos sociales a la optimización. Para ello se comenzará describiendo los resultados de la optimización VAN-Creación de empleo (Tabla 16). Cabe mencionar que, como se puede observar en la Figura 15, existen una gran cantidad de soluciones no dominadas y en el presente caso tan sólo se muestran algunas, como ejemplo de los resultados principales.

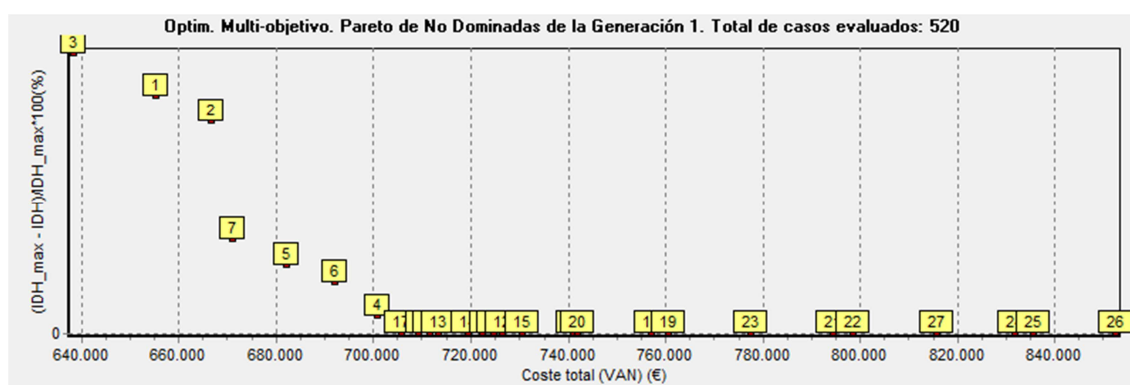


FIGURA 15. FRENTE DE PARETO DE OPTIMIZACIÓN VAN-CREACIÓN DE EMPLEO (PALARI).

Como se puede observar, la creación de empleo es ligeramente mayor a la que se obtenía en el sistema para Taba y, si bien el consumo eléctrico es similar en ambas comunidades, sí es cierto que en este caso ese consumo es cubierto en su mayor parte por la fotovoltaica, que como se describió anteriormente, tiene el índice de creación de empleo más alto de las tecnologías consideradas, bastante más alto que el de las centrales hidráulicas, en la que se basaba principalmente el sistema de Taba.

TABLA 16. RESULTADO OPTIMIZACIÓN VAN-CREACIÓN DE EMPLEO (PALARI).

Nº	Coste (VAN) (€)	Em.CO2 (kg/año)	ENS (kWh/año)	ENS (%)	Fracc. Ren. (%)	Coste E (€/kWh)	IDH	Empleos
1	655236.38	18762.73	5198.67	2.84	94.96	0.15	0.4273	5.9
2	666535.88	18643.01	4700.59	2.57	95.39	0.15	0.4276	5.9
3	638368.44	18981.83	6139.57	3.36	94.29	0.14	0.4268	5.8
4	700715.25	18335.87	483.94	0.26	98.64	0.15	0.4299	6.3
25	835572.38	21641.75	0.00	0.00	100.00	0.18	0.4301	7.4
26	852402.00	21759.60	0.00	0.00	100.00	0.19	0.4301	7.5
27	815692.38	21632.03	0.00	0.00	100.00	0.18	0.4301	7.4

Por último, al tener en cuenta el IDH, se debe aumentar el consumo disponible, como se comentó en el caso de Taba, para poder permitir el desarrollo de la comunidad a través del incremento de la productividad, el consumo en servicios comunitarios, consumos domésticos, etc. Esta vez el factor utilizado fue de un incremento del 60 % del consumo total, creándose un nuevo perfil de demanda. Los resultados de la optimización VAN-IDH son los que se muestran en la tabla.

Se observa algo muy similar a lo que ocurrió en el caso anterior, y es que debido a las limitaciones de componentes y al bajo consumo original de la población, un 60% puede parecer insuficiente para aumentar en gran proporción el IDH. No obstante, se puede ver la tendencia, alcanzándose valores de hasta 0.46 de IDH.

TABLA 17. RESULTADO OPTIMIZACIÓN VAN-IDH (PALARI).

Nº	Coste (VAN) (€)	Em.CO2 (kg/año)	ENS (kWh/año)	ENS (%)	Fracc. Ren. (%)	Coste E (€/kWh)	IDH	Empleos
1	757004.75	40320.68	96064.44	32.82	59.17	0.15	0.4372	5.3
2	1019350.50	73986.65	60097.92	20.53	62.42	0.18	0.4536	6.0
3	781950.19	36902.95	88591.97	30.27	63.08	0.15	0.4408	5.9
4	763989.94	37395.73	89838.02	30.70	62.48	0.15	0.4402	5.9
46	1268414.75	83520.32	33861.83	11.57	70.76	0.20	0.4641	7.6
47	1277239.62	83317.34	33183.19	11.34	71.11	0.20	0.4643	7.6
48	1243500.38	84312.35	36554.98	12.49	69.48	0.19	0.4630	7.6

Acudir al Anexo II para ver todos los resultados.

5. CONCLUSIONES

Cuando el acceso a la red eléctrica de un país es limitado, de baja calidad o incluso nulo, los sistemas híbridos de energía son una excelente opción para cubrir las necesidades energéticas de las personas que viven en las zonas rurales de países en vías de desarrollo. Estos sistemas permiten aprovechar los recursos autóctonos y hacerlo de una manera positiva social y medioambientalmente.

Existe una amplia literatura de optimización de los componentes de los sistemas híbridos basados en energías renovables. La optimización es, habitualmente, buscando la minimización del coste total actual neto (CAN o VAN), lo cual en algunos casos puede ser insuficiente. Por ello, actualmente se estudian cada vez más los métodos de optimización multi-objetivo, que permiten buscar soluciones óptimas acordes a diferentes objetivos normalmente en conflicto entre sí. iHOGA es una herramienta excelente para el cálculo de estos sistemas. La curva de frente de Pareto nos permite estudiar las soluciones no dominadas, de manera que finalmente haya que establecer prioridades en los objetivos, para alcanzar una solución válida para cada caso.

La optimización de doble objetivo VAN-Emisiones de CO₂ permite alcanzar soluciones medioambientalmente menos dañinas sin incrementar en gran cantidad los costes. El uso de los objetivos sociales (creación de empleo e IDH) permiten darle una visión más humana a estos problemas, orientando las soluciones hacia las personas y el desarrollo de las comunidades.

En este trabajo se han realizado diversos estudios de optimización mono-objetivo y multi-objetivo para el suministro eléctrico de dos comunidades situadas en Etiopía y en India. Los estudios de optimización multi-objetivo coste-IDH muestran que en ambas comunidades se puede mejorar el IDH (aumentando el consumo) pero con un sobre coste muy importante. La principal conclusión es que alcanzar un nivel de desarrollo adecuado no es simple, sino que será una cuestión de etapas, ya que un incremento muy grande del consumo (y por tanto del IDH) supondría la necesidad de inversiones demasiado altas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] (IEA) International Energy Agency. Chapter 18. Measuring progress towards energy for all. En: *World Energy Outlook (WEO) 2012 (Annexes)*. 2012, p.529-668.
- [2] PÉREZ ARRIAGA, José Ignacio y Ana MORENO ROMERO. Capítulo 4. Suministro de Energía. En: REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA, ed. *Tecnologías para el desarrollo humano de las comunidades rurales aisladas*. 2011, p.539. ISBN 9788495662446.
- [3] (AGECC) The Secretary General's Advisory Group on Energy and Climate Change. *Energy for a Sustainable Future: Summary Report and Recomendations*. Informe técnico, 2010.
- [4] PRACTICAL ACTION. *Poor people's energy Outlook 2014: Key messages on energy for poverty alleviation*, Rugby, UK: Practical Action Publishing. 2014, p.66. ISBN 978 1 85339 856 8.
- [5] BELWARD, A, et al. JRC (Joint Research Centre). *Renewable energies in Africa*. Informe técnico [online]. 2011, p.60. Extraído: doi:10.2788/1881
- [6] MOHAMMED, Y.S. et al. Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35. 2014, pp 527-539.
- [7] SÁNCHEZ CAMPOS, T y J. RAMÍREZ GASTÓN. *Manual de mini y micro centrales hidráulicas*. ITDG Perú (Lima). 1995.
- [8] BEKELE, G Y G. TADESSE. Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia. *Applied Energy* 9. 2012, pp 5-15.
- [9] SEN, R y S. C. BHATTACHARYYA. Off-grid electricity generation with renewale energy technologies in India: An application of HOMER. *Renewable Energy* 62. 2014, pp 388-398.
- [10] H. MONDAL, A y M. DENICH. Hybrid systems for decentralized power generation in Bangladesh. *Energy for Sustanibale Development* 14. 2010, pp 48-55.
- [11] KANASE-PATIL, A.B. et al. Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification or remote areas. *Renewable Energy* 35. 2010, pp 1342-1349.
- [12] H. ABRAHA, A. et al. Hybrid Solar-Wind-Diesel systems for rural application in North Ethiopia: Case study for three rural villages using HOMER simulation.
- [13] KENFACK, J. et al. Microhydro-PV hybrid system: Sizing a small hydro-PV hybrid system for rural electrification in developing countries. *Renewable Energy* 34. 2009, pp 2259-2263.
- [14] KHELIF, A. et al. Feasibility study of hybrid diesel-PV power plants in the southern of Algeria: case study of AFRA power plant. *Electrical Power and Energy Systems* 43. 2012, pp 546-553
- [15] A. TORCAL, M. et al. Optimización de sistemas híbridos fotovoltaico-eólicobaterías para abastecer poblados en África.

- [16] S. HOSSAN et al. (8-11 May of 2011). 'Optimization and modelling of a hybrid energy system for off-grid electrification'. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). 2011, pp 1-4. IEEE. Rome
- [17] DUFO-LÓPEZ, R. y J.L. BERNAL-AGUSTÍN. Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems. *Renewable Energy* 33. 2008, pp 2559-2572.
- [18] DUFO-LÓPEZ, R. et al. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. *Applied Energy* 88. 2011, pp 4033-4041.
- [19] BERNAL-AGUSTÍN, J.L. y R. DUFO-LÓPEZ. Multi-objective design and control of hybrid systems minimizing costs and unmet load. *Electric Power Systems Research* 79. 2009, pp 170-180.
- [20] PELET et al. Multiobjective optimisation of integrated energy systems for remote communities considering economics and CO₂ emissions. *International Journal of Thermal Sciences* 44 (12). 2005, pp 1180-1189
- [21] (CENER) Centro Nacional de Energías Renovables. Informe sobre tecnologías de electrificación en zonas rurales aisladas. Para el Proyecto REGEZRA de EsF (Energía sin Fronteras). 2009, p.31.
- [22] BERNAL-AGUSTÍN, J.L. y R. DUFO-LÓPEZ. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13. 2009, pp 2111-2118.
- [23] BAÑOS, R. et al. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Reviews* 15. 2011, pp 1753-1766.
- [24] FADAEE, M. y M.A.M RADZI. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16. 2012, pp 3364-3369
- [25] DUFO-LÓPEZ, R. Manual de usuario iHOGA versión 2.2. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Zaragoza. 2013.
- [26] ROJAS-ZERPA, J.C. 'Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones'. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería eléctrica. 2012.
- [27] DUFO-LÓPEZ R. y J.L. BERNAL-AGUSTÍN. New Methodology for the Generation of Hourly Wind Speed Data Applied to the Optimization of Stand-Alone Systems. *Energy Procedia, Volume 14*. 2012, pp 1973-1978. (Presentado en el 2011 2nd International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2011). Bangkok, Thailand, December 26, 2011).
- [28] Szabó, S. et al. Energy solutions in rural Africa: mapping electrification costs of distributed solar and diesel generation versus grid extensión. *Environmental Research Letters* 6. 2011