



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DISTINTAS CONFIGURACIONES DE SISTEMAS RENOVABLES PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA ZONA AISLADA EN MANIEMA (REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DEL CONGO)

AUTOR: RUBÉN SORO BLANCO

TUTOR: ELISA PEÑALVO LÓPEZ

Selección

Curso Académico: 2018-19

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1	Objetivo del proyecto	11
1.2	Motivación y justificación	11
2	MARCO TEÓRICO	12
2.1	Recursos y Tecnologías	12
2.1.1	Solar Fotovoltaica	12
2.1.2	Turbina Eólica	14
2.1.3	Mini hidráulica	16
2.1.4	Gasificador	18
2.1.5	El diésel	19
2.2	Equipos auxiliares	20
2.2.1	Inversor	20
2.2.2	Baterías	20
2.2.3	Regulador de carga	21
2.3	Software informático	21
2.4	Fundamentos teóricos del AHP	22
2.4.1	Pasos del método AHP.....	22
3	METODOLOGÍA.....	25
3.1	Contexto socio-económico de la República Democrática del Congo ...	27
3.2	Macro-análisis	29
3.2.1	Escenario tendencial.....	31
3.2.2	Escenario propuesto	38
3.2.3	Comparativa de escenarios	40
3.3	Micro-análisis en un caso concreto	40
3.3.1	Caracterización de la demanda	40

3.3.2	Recursos energéticos.....	42
3.3.3	Equipos seleccionados.....	47
3.3.4	Equipos auxiliares	51
3.4	Método AHP.....	52
3.4.1	Alternativas.....	53
3.4.2	Selección de criterios.....	61
3.4.3	Ponderación de criterios y alternativas.....	63
3.4.4	Cálculo de pesos y selección.....	70
4	CONCLUSIONES	72
5	BIBLIOGRAFÍA	73
	ANEXO I: Encuesta a expertos	1
	Criterios de primer nivel	1
	Criterios de segundo nivel (económico)	1
	Criterios de segundo nivel (técnico)	2
	Criterios de segundo nivel (medioambiental)	3
	Criterios de tercer nivel.....	3
	PRESUPUESTO.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Irradiancias medidas usualmente Fuente: Apuntes de introducción a las energías renovables.....	13
Figura 2. Curvas I-V en función de Temperatura y Radiación. Fuente: Apuntes de Tecnología Energética	14
Figura 3. Rosa de los vientos. Fuente: Apuntes de Introducción a las energías renovables.	15
Figura 4. Curvas de potencia en función de vel. del viento y aerogeneradores de eje vertical y horizontal. Fuente: Apuntes de Tecnología Energética.	16
Figura 5. Número de ciclos de vida en función de la profundidad de descarga. Fuente: https://deltavolt.pe	21
Figura 6. Desarrollo del documento	26
Figura 7. República democrática del Congo. Fuente: https://es.zenit.org	27
Figura 8. Provincias de la República Democrática del Congo. Fuente: https://www.wikiwand.com	28
Figura 9. Provincia de Maniema. Fuente: https://es.wikipedia.org	29
Figura 10. Porcentaje por fuente en consumo final. Fuente: Propia.	31
Figura 11. Evolución del consumo de energía final por sector. Fuente: Propia.	33
Figura 12. Evolución de la población y el PIB. Fuente: Propia.....	35
Figura 13. Generación de electricidad por fuente. Fuente: Propia.	38
Figura 14. Demanda de energía por fuente. Fuente: Propia.....	38
Figura 15. Demanda a lo largo de año. Fuente: HOMER.....	42
Figura 16. Radiación solar diaria e índice de claridad en Imonga. Fuente: HOMER	43
Figura 17. Rosa de los vientos de Imonga. Fuente: Enair	45
Figura 18. Precipitaciones en Imonga. Fuente: https://es.climate-data.org	46
Figura 19. Curva de potencia del aerogenerador. Fuente: Enair	49
Figura 20. Producción mensual de electricidad. Fuente: HOMER.....	53
Figura 21. Resumen costes configuración 1. Fuente: HOMER.	54

Figura 22. Producción mensual de electricidad. Fuente: HOMER.....	55
Figura 23. Resumen costes configuración 2. Fuente: HOMER.	56
Figura 24. Emisiones de la configuración 2. Fuente: HOMER.	57
Figura 25. Producción mensual de electricidad. Fuente: HOMER.....	57
Figura 26. Resumen costes configuración 3. Fuente: HOMER.	58
Figura 27. Emisiones de la configuración 3. Fuente: HOMER.	59
Figura 28. Producción mensual de electricidad. Fuente: HOMER.....	59
Figura 29. Resumen costes configuración 4. Fuente: HOMER.	60
Figura 30. Aspectos económicos de la configuración 4. Fuente: Propia.	60
Figura 31. Emisiones de la configuración 4. Fuente: HOMER.	61
Figura 32. Resumen de criterios. Fuente: Propia.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo establecimiento de prioridades. Fuente: Propia.....	23
Tabla 2. Ejemplo de matriz de decisión. Fuente: Propia	24
Tabla 3. Energía primaria en RCD. Fuente: Propia	30
Tabla 4. Consumo de energía final en 2016. Fuente AIE.....	31
Tabla 5. Consumo de energía final por sector y año. Fuente: AIE.....	33
Tabla 6. Datos de población y PIB de la RDC. Fuente: AEI.....	35
Tabla 7. Consumo de energía por sectores y fuente en 2016. Fuente: AIE	36
Tabla 8. Consumo de energía por sectores y fuente en 2030, escenario tendencial. Fuente: Propia.	37
Tabla 9. Consumo de energía por sectores y fuente en 2030, escenario propuesto. Fuente: Propia.....	39
Tabla 10. Demanda de comercios. Fuente: Atlas de en. renovables de la RDC .	41
Tabla 11. Radiación solar e índice de claridad en Imonga. Fuente: PVGIS.....	43
Tabla 12. Velocidad media del viento por mes en Imonga. Fuente: Enair.....	45
Tabla 13. Costes de la instalación fotovoltaica. Fuente: Propia.....	48
Tabla 14. Costes de la instalación eólica. Fuente: Propia.....	50
Tabla 15. Costes de la central hidráulica. Fuente: Propia	50
Tabla 16. Costes del gasificador de biomasa. Fuente: Propia.	51
Tabla 17. Aspectos económicos de la configuración 1. Fuente: Propia.	54
Tabla 18. Aspectos económicos de la configuración 2. Fuente: Propia.	56
Tabla 19. Aspectos económicos de la configuración 3. Fuente: Propia:	58
Tabla 20. Ponderación de los criterios de primer nivel. Fuente: Propia.	63
Tabla 21. Ponderación criterios económicos. Fuente: Propia	64
Tabla 22. Ponderación criterios técnicos. Fuente: Propia	64
Tabla 23. Ponderación criterios medioambientales. Fuente: Propia.	65
Tabla 24. Ponderación inversión inicial. Fuente: Propia.	65

Tabla 25. Ponderación coste de mantenimiento. Fuente: Propia.....	66
Tabla 26. Ponderación coste de producción. Fuente: Propia.....	66
Tabla 27. Ponderación coste de fuel. Fuente: Propia.....	67
Tabla 28. Ponderación exceso de electricidad. Fuente: Propia.....	67
Tabla 29. Ponderación autonomía. Fuente: Propia.....	68
Tabla 30. Ponderación eficiencia. Fuente: Propia.....	68
Tabla 31. Ponderación emisiones. Fuente: Propia.....	69
Tabla 32. Ponderación fracción renovable. Fuente: Propia.....	69
Tabla 33. Ponderación impacto ambiental. Fuente: Propia.....	70
Tabla 34. Pesos totales. Fuente: Propia.....	71

MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo del proyecto

El objetivo del Trabajo de Fin de Grado presente es la realización de un sistema híbrido renovable con el fin de abastecer con energía eléctrica una zona aislada de la red.

En el diseño de este sistema se tendrá en cuenta la demanda de la zona de estudio y los recursos energéticos que esta tiene a su alcance para poder realizar de la forma más óptima el análisis global. Mediante la demanda y los recursos de la zona, se procederá a la obtención de diversas alternativas que puedan satisfacer las necesidades de la zona, generando, en primera instancia, el análisis técnico y económico de cada una de estas propuestas. Finalmente, mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), en el que participarán diversos expertos, se convergerá a la mejor alternativa.

1.2 Motivación y justificación

La motivación de este trabajo se basa en la necesidad de hacer llegar la electricidad a aquellas zonas asiladas, en las que la vida es bastante precaria y en las que la energía eléctrica podría hacer mejorar las condiciones de vida en las que se vive en países con un grado de electrificación muy bajo. Las energías renovables son la vía más limpia y más efectiva, ya que en estas zonas hay un gran potencial renovable que se está echando a perder.

A través de este trabajo quiere hacerse ver el interés que se ha adquirido en el Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales en las energías renovables como solución a muchos de los problemas que existen en la sociedad actual. Con ellas se puede hacer llegar electricidad a zonas aisladas, pero también se puede reducir el número de emisiones que genera el uso continuado de combustibles fósiles.

De este modo, la propuesta de este trabajo va enfocada a una mejora social de los países en vías de desarrollo, en los que sí se puede mejorar el nivel de vida con la ayuda de las energías renovables. Para ello también se va a hacer uso del método AHP, para que no haya discrepancias, para que todos los ámbitos en los que pueda verse involucrado el proyecto puedan ser valorados por expertos en cada uno de estos ámbitos, escogiendo la mejor alternativa final.

2 MARCO TEÓRICO

En este punto se van a redactar los fundamentos teóricos y se van a definir los conceptos más importantes a tratar con el fin de hacer más fácil la interpretación del presente TFG.

2.1 Recursos y Tecnologías

2.1.1 Solar Fotovoltaica

Radiación Solar

La radiación solar es la energía emitida por el Sol. Es una radiación que se genera a partir de reacciones termonucleares de fusión generadas en el núcleo solar y que producen radiación electromagnética en varias frecuencias o longitudes de onda, propagándose en el espacio a las velocidades de estas ondas, que permite llevar energía solar con ellas. La longitud y la frecuencia de las ondas electromagnéticas indican la energía, poder de penetración y visibilidad de éstas. Todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de 299.792 Km/s.

Esta energía emitida por el Sol es emitida en todas direcciones, con lo que a la Tierra solo llega una porción de esta energía. Por otro lado, la cantidad de energía que llega a la Tierra depende de la distancia entre la Tierra y el Sol, que varía a lo largo del año. De aquí nace la constante solar, que es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie en un plano perpendicular a los rayos solares en el exterior de la atmósfera, cuyo valor medio es aproximadamente 1366 Wm^{-2} . Esta radiación es inferior a la que llega a la superficie de la Tierra, ya que una parte de ésta es reflejada y/o absorbida por la atmósfera.

La radiación que incide sobre la superficie terrestre se divide en directa, difusa y de albedo. La directa es la que proviene directamente del Sol, sin ninguna desviación; la difusa es la radiación cuya dirección ha sido modificada debido a la dispersión producida por ciertos componentes de la atmósfera; y, por último, la de albedo es la radiación reflejada por la superficie de la Tierra.

Estos diferentes tipos de radiación incidente se pueden medir de diversos modos en función de cómo se instale el sistema de adquisición de datos solares, y en función del tipo de radiación que se quiera saber en la zona de estudio.

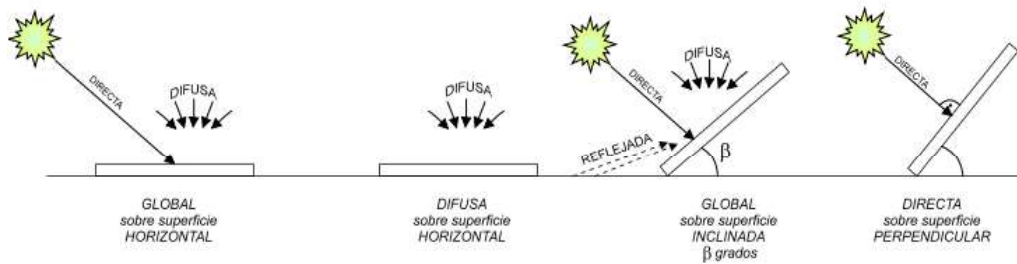


Figura 1. Irradiancias medidas usualmente Fuente: Apuntes de introducción a las energías renovables

La energía que podemos obtener a partir de esta radiación solar se denomina energía solar fotovoltaica y va a ser una de las energías claves de nuestro estudio.

La generación fotovoltaica es la obtención de energía eléctrica a partir de la interacción de la luz solar sobre un cierto material especial que, mediante la incidencia de la luz sobre este, es capaz de producir una corriente de electrones. Esto se denomina efecto fotoeléctrico y permite transformar la radiación directa y la difusa en corriente eléctrica continua.

Tecnología Fotovoltaica

La obtención de esta energía se efectúa mediante células fotovoltaicas, que están formadas por materiales semiconductores, principalmente silicio. Dentro de este material podemos obtener silicio monocristalino, policristalino o amorfo. Las células fotovoltaicas están formadas por dos capas de esos materiales (P-N). Una capa está dopada con un número menor de electrones de valencia que el silicio, como podría ser el boro (capa P); y la otra capa está dopada con un número mayor de electrones de valencia que el silicio, como podría ser el fósforo (capa N). Lo que ocurre en esta célula es lo siguiente: los fotones procedentes de la luz solar inciden sobre la capa N, consiguiendo liberar electrones de los átomos de silicio y de este modo se produce una diferencia de potencial entre la capa N y la capa P, permitiendo el flujo de corriente a través de la célula y generando corriente eléctrica cuando se conecta una carga a esta.

Lo que caracteriza a una célula fotovoltaica es su intensidad y voltaje en las condiciones de trabajo. Esto va en función de la radiación que reciba la célula y de la temperatura a la que esté sometida. A mayor radiación, mayor será la potencia generada; y a mayor temperatura, menor será esta potencia.

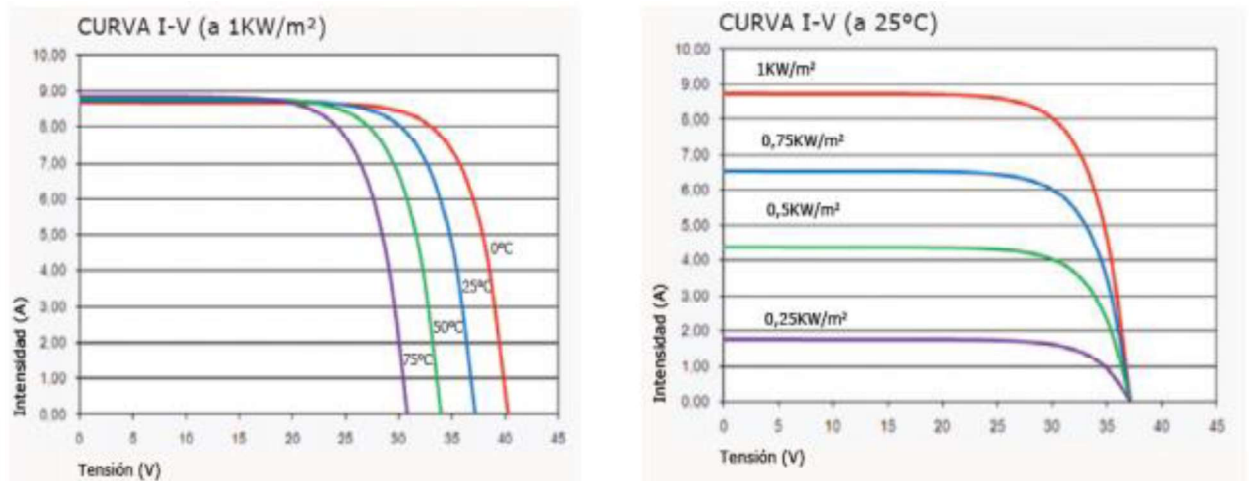


Figura 2. Curvas I-V en función de Temperatura y Radiación. Fuente: Apuntes de Tecnología Energética

Por otro lado, cabe mencionar que estas células como elementos individuales tienen pocas aplicaciones ya que dan niveles de tensión muy bajos por célula. De este modo lo que hay que hacer es asociar en serie varias células (generalmente 36 o 72) para obtener unos valores de tensión adecuados a las aplicaciones y usos que se les va a dar.

2.1.2 Turbina Eólica

El viento

El viento es un fenómeno atmosférico producido por la variación de presión atmosférica que se produce en el planeta. Debido a esto el aire no puede estar nunca en reposo, desplazándose continuamente en el tiempo y originando un flujo denominado viento, definido en función de su velocidad y dirección. El viento sopla desde las zonas de alta presión a las de baja, debido a la expansión y convección del aire al absorber la Tierra la radiación solar. De esta forma se modifica su dirección en función de la rotación de la Tierra, de su efecto centrífugo y de la variación de radiación solar.

Las diferencias de presión comentadas anteriormente son debidas a que la radiación solar no es la misma en toda la superficie, calentando unas zonas más que otras. De este modo el aire que se encuentra más caliente asciende creando una depresión, mientras que el aire frío desciende creando una zona de presión alta. Estas variaciones de presión son las que hacen mover el aire generando el viento.

Para el estudio de la viabilidad del aprovechamiento del recurso eólico en una zona es necesario conocer la velocidad y dirección del viento de la posición geográfica de estudio. La dirección del viento se denomina en función del lado por el que sopla y

se mide con un aparato denominado veleta. Por otro lado, la velocidad del viento se mide con unos aparatos denominados anemómetros.

Estos datos son recogidos en un diagrama denominado rosa de los vientos, que representa el tanto por ciento de viento con la dirección y su velocidad media, dejando ver que la dirección del viento suele variar entorno a una dirección media.

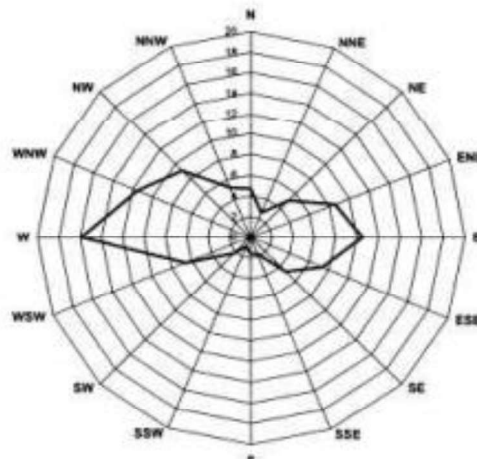


Figura 3. Rosa de los vientos. Fuente: Apuntes de Introducción a las energías renovables.

Tecnología Eólica

La energía que se extrae del viento se denomina energía eólica. Esta energía aprovecha la velocidad que lleva el viento (energía cinética) para generar energía eléctrica mediante aerogeneradores. La aleatoriedad y la variabilidad del viento son las principales desventajas de la energía eólica, ya que pueden desestabilizar la red. También cabe mencionar las principales ventajas de las instalaciones eólicas, como podrían ser la conversión eficiente a energía eléctrica o la capacidad de generación, ya que existen aerogeneradores de baja potencia como podrían ser unos pocos centenares de vatios, hasta algunos megavatios.

Los aerogeneradores mencionados anteriormente tienen muchas variantes en función de la posición del eje y su posición relativa respecto del viento. Por un lado, tenemos los aerogeneradores de eje vertical, que es el modelo más simple y de menor potencia, como podrían ser los que cuentan con 2 o 4 chapas verticales sin perfil y curvadas que generan energía eléctrica mediante la resistencia que oponen estas superficies verticales al viento. Son aerogeneradores de bajo rendimiento, pero no necesitan una orientación determinada, ya que captan el viento desde cualquier

dirección. Por otro lado, tenemos los aerogeneradores de eje horizontal (los de mayor potencia), que pueden ser a barlovento, ya que el viento encuentra antes el rotor de este, o de sotavento, que encuentran antes a la torre. Los primeros presentan una mejor eficiencia ya que no existen interacciones del viento con la torre antes de llegar al rotor, que es donde se produce el giro de las aspas que desencadenará en la generación de energía eléctrica. El inconveniente que existe en los de barlovento es que no se alinean automáticamente con la dirección del viento, es decir, solo girarán las aspas cuando la dirección del viento sea perpendicular al plano generado por estas. Es por ello que necesitan un sistema de orientación como podría ser una aleta direccional para poder generar energía eléctrica para cualquiera que sea la dirección del viento. Por último, los de sotavento tienen el inconveniente del efecto negativo producido por la interacción del viento con la torre antes de llegar al rotor del aerogenerador. La principal ventaja es que sí que se alinean con el viento.

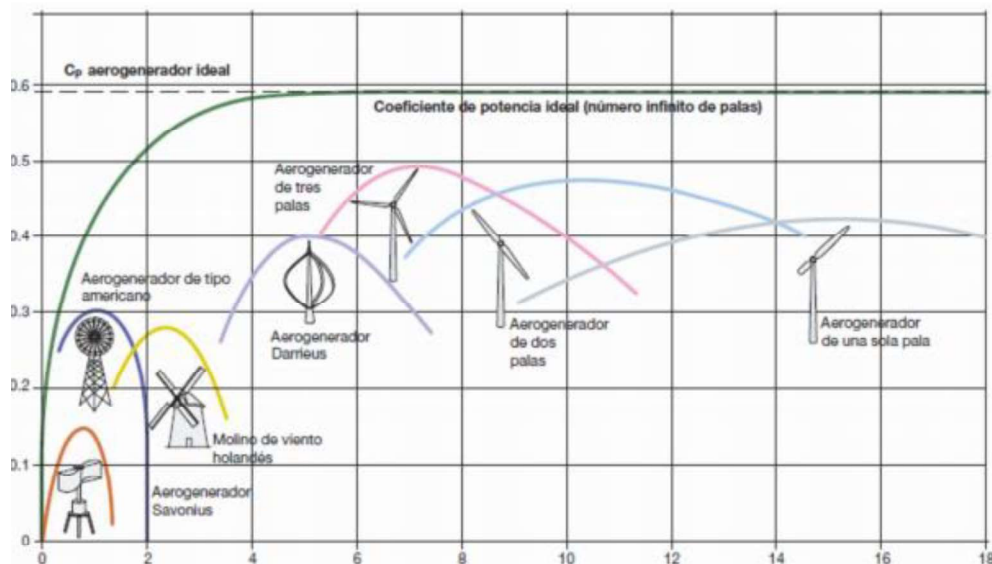


Figura 4. Curvas de potencia en función de velocidad del viento y diferentes aerogeneradores de eje vertical y horizontal. Fuente: Apuntes de Tecnología Energética.

2.1.3 Mini hidráulica

Recurso hídrico

Actualmente el recurso hidráulico es uno de los recursos a través del cual obtener energía de forma más limpia y económica. El agua es un recurso renovable ya que mediante el ciclo del agua este nunca se agota. Una vez el agua ha cumplido su función sigue circulando a través de ríos, lagos o mares, en donde la radiación solar entra en juego. Es esta radiación la que evapora el agua de la superficie. El vapor de agua generado asciende y forma las nubes, que más adelante creará gotas que precipitarán

formando la lluvia que podrá ser retenida en embalses elevados en los que se podrá aprovechar la energía potencial del agua, debido a la altura a la que está situada para, posteriormente, ser transformada en energía cinética y aprovechar esta en una turbina para generar energía eléctrica.

Tecnología Hidráulica

Por tanto, la energía hidráulica es una combinación de transformaciones energéticas para la obtención final de energía eléctrica, pasando de la energía potencial del agua por la altura a la que está almacenada a energía cinética por la liberación de esta agua reduciendo su altura a medida que gana en energía cinética, y llegando a energía mecánica en la turbina que, posteriormente con un alternador, será transformada en la energía final que queremos obtener.

El método de obtención de esta energía es mediante centrales hidroeléctricas. Estas están constituidas por una central eléctrica donde se produce la electricidad, una presa que controla el paso del agua y un depósito o embalse de agua. Las centrales hidroeléctricas pueden ser de agua fluyente, donde es el agua de un río la que es desviada hacia una sala de turbinas para obtener energía eléctrica a partir de su energía cinética para, posteriormente, ser devuelta a su cauce. También tenemos las centrales hidroeléctricas a pie de presa, que son las que se sitúan en la parte baja de depósitos o embalses para aprovechar la energía potencial almacenada en el agua; las centrales en canal de riego o de abastecimiento, que son las centrales que aprovechan las construcciones de abastecimiento de agua de riego o a poblaciones para extraer energía de estas aguas; y, por último, las centrales de bombeo o reversibles, que son las centrales que pueden turbinar agua desde un depósito cuando necesiten energía, o pueden bombear agua a un depósito elevado cuando haya excedente de energía.

Para llevar a cabo esta obtención de energía eléctrica es necesario tener la turbina adecuada para cada instalación en función de las necesidades del usuario. Estas turbinas pueden ir desde potencias inferiores a 1 megavatio para microcentrales hidráulicas, hasta potencias de más de 10 megavatios para centrales de gran potencia, pasando por valores intermedios en minicentrales hidráulicas. Dentro de este rango tenemos las siguientes turbinas, que son las más utilizadas: la turbina Kaplan, que es una turbina axial para grandes caudales y poca presión; la turbina Hélice, que es parecida a la Kaplan pero con ángulo de palas fijo; la turbina Pelton, que es una turbina de flujo transversal para grandes presiones y poco caudal; la turbina Francis, que es de flujo

mixto para grandes presiones y caudales medios; y, por último, la turbina Ossberger, de admisión radial y parcial para régimen lento.

2.1.4 Gasificador

Biomasa

La biomasa es todo aquel material de origen biológico que puede ser aprovechado como fuente de energía. Los principales son los vegetales, que son organismos fotosintéticos que, mediante sustancias inorgánicas como CO_2 y agua son capaces de transformar la energía solar en energía química. Esta biomasa, mediante un proceso adecuado es capaz de liberar esta energía contenida en forma de energía química, produciendo CO_2 y agua en el proceso. Cabe indicar que la biomasa debe ser producida de forma reciente para poder ser englobada en este grupo, por tanto, hay que excluir de este a los combustibles fósiles.

La biomasa procede de diferentes recursos y, de entre los biocombustibles sólidos podemos destacar las astillas, los pellets, la leña, las briquetas y los residuos agroalimentarios. De este modo, para poder diferenciar entre cada tipo de biocombustible, tenemos que echar mano de las diferentes características de cada uno, de entre las que cabe nombrar el poder calorífico, la humedad y los volátiles contenidos, el porcentaje de cenizas y el carbono fijo. El poder calorífico nos indica la cantidad de energía que se desprende en la combustión completa de un kilogramo de este combustible, pudiendo ser este bruto o neto. La diferencia entre estos es que en el poder calorífico neto se considera que el vapor de agua contenido en los gases obtenidos en la combustión no condensa y no hay aporte adicional de calor por la condensación de este. El contenido en humedad hace referencia a la cantidad de agua que contiene el combustible y, el de volátiles se refiere a los compuestos que son gasificados inicialmente a partir de materiales celulósicos. Las cenizas son los constituyentes inorgánicos contenidos en el biocombustible, como podrían ser calcio, magnesio... Y, por último, el carbono fijo, que es lo correspondiente al contenido en lignina, que hace más eficiente y limpia la combustión.

La energía de la biomasa se puede extraer de diversas formas, entre las cuales está la combustión directa de esta, la combustión tras un proceso de transformación en un combustible para un mejor aprovechamiento energético final, la transformación termoquímica de un sólido y el procesado bioquímico.

Gasificador

La tecnología que se va a utilizar es el gasificador de biomasa, consistente en la obtención de energía eléctrica a partir de la biomasa en un proceso termoquímico a alta temperatura para conseguir la descomposición térmica de materia orgánica mediante la acción de un gas, que reacciona con un residuo carbonoso formado en el proceso de descomposición térmica. Este proceso de gasificación contiene varias etapas. Una primera etapa sería la de secado, donde lo que se pretende conseguir es eliminar toda la humedad contenida en el combustible. A esta le sigue un proceso de pirolisis para descomponer la biomasa en parte sólida, líquida y gaseosa. A continuación, se produce la oxidación de los gases mediante la adición del gasificante y, por último, se tiene el proceso de reducción, donde se produce la reducción de los gases obtenidos en la fase de oxidación, obteniéndose el producto final y deseado.

Por último, dentro de los gasificadores, tenemos 2 tecnologías, las de lecho fijo y las de lecho fluido. Las de lecho fijo suelen ser downdraft donde el aire desciende por el gasificador, adquieren una temperatura más elevada y suelen ser para bajas potencias. Los gasificadores de lecho fluido, como podría ser el burbujeante, adquieren temperaturas más bajas y son utilizados para altas potencias.

2.1.5 El diésel

El diésel es un hidrocarburo en estado líquido que está compuesto por parafinas, que son un grupo de hidrocarburos alcanos. Para su obtención se calienta petróleo crudo. El vapor obtenido se condensa y se vuelve a calentar para obtener fuel oil. En la siguiente destilación se obtiene el diésel o gasóleo. En cada destilación lo que se consigue es un hidrocarburo más ligero, dejando los residuos obtenidos para diferentes cosas. Posteriormente, el producto destilado, en este caso diésel, es purificado y completado con aditivos para hacerlo más eficiente y menos contaminante.

El diésel es un combustible fósil utilizado habitualmente como combustible en motores y en calefacción. Lo que consiguen los generadores diésel es, a partir de la energía química del diésel, generar energía mecánica en un motor para, posteriormente, generar energía eléctrica mediante un alternador que va acoplado a este motor. Cabe destacar que se utiliza generalmente diésel ya que estos tipos de motores presentan un mejor rendimiento que sus equivalentes de gasolina.

2.2 Equipos auxiliares

2.2.1 Inversor

Un inversor es un aparato electrónico cuya función es transformar corriente continua en corriente alterna para poder emplearla en una vivienda. Una placa solar, cuando genera electricidad, la genera en corriente continua, al igual que es almacenada en el sistema de almacenamiento de energía (las baterías), por tanto, necesitamos de un aparato que nos transforme esta corriente a alterna para poder darle un uso más generalizado en una vivienda como ya se ha comentado.

El inversor regula la intensidad que debe proporcionar el generador fotovoltaico para hacer que este siempre pueda trabajar en el punto de máxima potencia. Por esto el inversor es uno de los componentes más importantes de las redes aisladas, híbridas o de conexión a red.

2.2.2 Baterías

En una instalación aislada, en ocasiones, es necesaria alguna forma de almacenamiento para que la energía producida durante el día y no consumida durante este, se puede consumir en momentos en los que el Sol no incide sobre nuestra instalación. Esto es debido a que la energía solar y el consumo no deben por qué coincidir, entonces puede existir cierto excedente a almacenar para poder consumir en ciertas horas donde no hay radiación solar.

Las baterías existentes en el mercado varían en función de su capacidad. Son capaces de almacenar entre 0,1 y 100 kWh. Esta capacidad se va reduciendo debido a los ciclos de carga y descarga. Cuanto más profunda sea la descarga de la batería, mayor va a ser su pérdida de capacidad en el tiempo, reduciendo su vida útil.

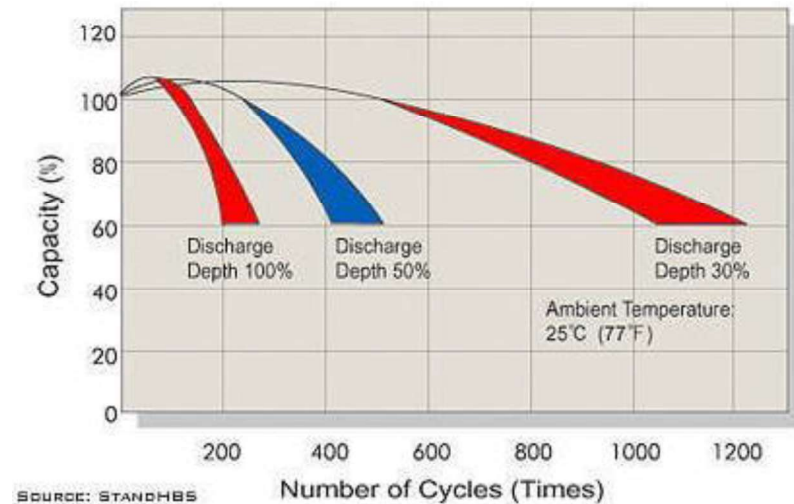


Figura 5. Número de ciclos de vida en función de la profundidad de descarga. Fuente: <https://deltavolt.pe>

Las baterías más comunes utilizadas en sistemas aislados (en los que se precisa un almacenamiento) son las de plomo y ácido, ya que son de las más baratas y pueden cargarse con corrientes de intensidad variable.

2.2.3 Regulador de carga

EL regulador de carga es un dispositivo electrónico cuya función es obtener la máxima potencia del generador fotovoltaico a cada momento y proteger nuestro sistema de almacenamiento, es decir, las baterías.

En sí, lo que realiza el regulador de carga es interrumpir la conexión entre las baterías y los paneles fotovoltaicos en el momento en que estas están totalmente cargadas o, en su caso, cortar la conexión con la red de consumo para evitar que una descarga muy profunda de las baterías pueda afectar a la vida útil de estas.

Otra de sus funciones es evitar sobretensiones a la entrada de las baterías que las puedan dañar.

2.3 Software informático

Las diferentes configuraciones que se van a proponer para el abastecimiento de la zona aislada de estudio y el análisis técnico y económico de las mismas se va a realizar mediante la utilización de un programa informático llamado HOMER. HOMER es un software que nos proporciona la optimización de sistemas híbridos para el abastecimiento de una demanda dada al menor coste posible.

Para generar las diferentes opciones que HOMER nos da, tenemos que introducir la curva de demanda eléctrica de la zona de estudio, el conjunto de componentes

tecnológicos que formarán la instalación futura y los recursos energéticos disponibles, para así poder ir generando iteraciones hasta encontrar las diferentes soluciones posibles en base a los datos introducidos.

2.4 Fundamentos teóricos del AHP

El método AHP es una de las técnicas más importantes que hay en la toma de decisiones multicriterio (Proceso Analítico Jerárquico). Con este método lo que se pretende es ser capaz de tomar decisiones en proyectos, valorando los diferentes criterios o puntos de vista que intervienen en el problema. Tomar decisiones trae consigo buenas o malas consecuencias, por tanto, hacerlo de forma metódica utilizando la información para poder tomarlas con una mayor certeza, hace que podamos implementarlas mejor. Una de las bases de este método consiste en establecer una prioridad entre diferentes alternativas cuando en ella intervienen varios decisores con sus diferentes preferencias y puntos de vista.

El método AHP fue propuesto por el profesor Thomas Saaty sobre los años 70, y se basa en la toma de decisiones mediante la jerarquización de los problemas que se plantean. Para ello, en cada nivel jerárquico, lo que se plantean son una serie de comparaciones pareadas entre los elementos que lo componen, basándose en la importancia o contribución de cada uno de ellos al nivel jerárquico superior al que hacen referencia, dando como resultado una escala de prioridades entre estos elementos. Una vez obtenidas todas las prioridades o pesos de todos los niveles, se procede a calcular cuál de las alternativas propuestas se ajusta mejor a las preferencias obtenidas con el método. Todo ello se evalúa mediante la escala numérica que el método propone.

En resumen, el método AHP tiene como bases principales que el decisor sea capaz de realizar comparaciones en base a sus preferencias, que los diferentes elementos de un nivel jerárquico sean comparables, que los criterios sean independientes de las propiedades de las distintas alternativas y que todos los elementos del problema a resolver sean tenidos en cuenta por el decisor.

2.4.1 Pasos del método AHP

2.4.1.1 *Jerarquización del problema*

En el método AHP el problema se divide en 3 niveles. El primer nivel es el objetivo del problema, es decir, la meta que se quiere conseguir. El segundo nivel hace referencia a la definición de los criterios. Estos se forman mediante una estructura jerárquica descendente desde varios objetivos, descomponiendo estos últimos en otros objetivos

de nivel inferior. Los criterios se deben de poder cuantificar para poder utilizarse en este método, por ello, los criterios que no sean medibles numéricamente deben de ser comparados mediante otros procedimientos como cuestionarios al decisor. Con ello se pretende plantear el problema de forma completa, identificando los atributos que ayudan a la solución y a las personas participantes e interesadas en el problema. En el tercer y último nivel están las alternativas consideradas.

2.4.1.2 Cálculo de prioridades

El establecimiento de prioridades se realiza mediante la comparación pareada de los elementos que conforman un mismo nivel. Lo que se hace es comparar los criterios uno a uno con otro criterio, de forma que se saque de cada comparación cuál de los dos criterios es más importante, menos o igual. Para ello se asignan los siguientes valores:

- 1 Igual importancia
- 3 Importancia moderada de uno sobre otro
- 5 Importancia fuerte de uno sobre otro
- 7 Importancia muy fuerte de uno sobre otro
- 9 Extrema importancia de uno sobre otro
- 2, 4, 6, 8 son valores medios para afinar más a la hora de comparar

Como ejemplo, si el criterio A domina con un 5 al B, se asignan los siguientes valores: $A=5$; $B=1/5$. Y ello se pondría en una matriz cuadrada de orden igual al número de criterios, estando la diagonal a 1. Posteriormente se debe calcular la media geométrica, cuyo valor se adquiere mediante la multiplicación sucesiva de todos los elementos de cada fila de la matriz y la realización de la raíz, de orden igual al número de prioridades de la matriz, sobre el producto mencionado. Por último, se debe normalizar la media geométrica obtenida. Para ello, se divide la media geométrica entre la suma de medias geométricas.

Criterio	A	B	Media geom	Media geom norm
A	1	5	2,236	0,833
B	1/5	1	0,447	0,167

Tabla 1. Ejemplo establecimiento de prioridades. Fuente: Propia.

Lo mismo que se acaba de hacer para seleccionar qué criterios tienen más peso, se hace para seleccionar qué alternativa tiene más peso dentro de cada criterio. Para cada criterio se evalúan las diferentes alternativas mediante el mismo procedimiento.

2.4.1.3 Matriz de decisión

Para construir la matriz de decisión se deben obtener los pesos de los diferentes criterios (segundo nivel) y los pesos de cada alternativa dentro de cada criterio (tercer nivel). Una vez se tienen todos estos datos, se colocan en una matriz donde las columnas hacen referencia a cada criterio, la primera fila a los pesos de estos y las siguientes filas a cada alternativa y a su valor de prioridad por criterio.

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Pesos	0,25	0,35	0,4
Alternativa 1	0,6	0,5	0,7
Alternativa 2	0,4	0,5	0,3

Tabla 2. Ejemplo de matriz de decisión. Fuente: Propia

2.4.1.4 Cálculo de prioridades globales

Para calcular las prioridades globales asociadas a cada alternativa se hace una suma ponderada de las prioridades de cada nivel, es decir, para sacar el valor de prioridad de una alternativa, se debe multiplicar el valor de prioridad de la alternativa dentro de un criterio, por el valor de prioridad del criterio. Se hace lo mismo con cada criterio dentro de la alternativa y se suman entre sí, dando como valor final la prioridad global. Echando mano de la tabla del punto anterior, quedaría tal que así:

$$\text{Alternativa 1} = 0,6 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,35 + 0,7 \cdot 0,4 = 0,605$$

$$\text{Alternativa 2} = 0,4 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,35 + 0,3 \cdot 0,4 = 0,395$$

De esta forma, se elegiría la Alternativa 1 como la mejor opción, con un 60,5%.

3 METODOLOGÍA

En el presente apartado se va a exponer como va a ser el proceso mediante el que se va a llegar a obtener de forma satisfactoria el objetivo final del trabajo.

En un primer lugar, se va a realizar un estudio general sobre el contexto económico, social y energético en el que está el país. Para ello se van a generar dos escenarios energéticos, uno para valorar un futuro en el que las cosas sigan como están yendo hasta ahora, y otro basado en la mejora de las condiciones en las que vive el país, para un mejor abastecimiento de energía y unas mejores condiciones de vida.

Posteriormente, se va a profundizar más en la zona que va a ser caso de estudio, es decir, se va a profundizar más en Maniema, que va a ser la provincia en la que se va a realizar el estudio para poder realizar una instalación renovable. Se va a seguir con el estudio de los recursos energéticos y la demanda del poblado en el que el trabajo va a estar enfocado. Con ello, se van a seleccionar los distintos equipos y potencias que se van a utilizar para poder cubrir la demanda.

Una vez se conozcan todos los datos mencionados en el párrafo anterior, se va a introducir esto en el software HOMER, que va a realizar el análisis técnico-económico de las muchas posibles soluciones que podrán abastecer, mejor o peor, las necesidades de la zona.

Para finalizar, se va a hacer uso del método AHP para escoger la mejor solución de entre las diferentes alternativas seleccionadas. El método AHP se va a iniciar mediante una serie de encuestas a expertos, los cuales van a ser anónimos para respetar su intimidad. Mediante estas encuestas lo que se pretende es obtener qué criterios de decisión van a ser los más importantes a la hora de escoger cuál va a ser la mejor alternativa. Una vez realizadas las encuestas, se van a aplicar estos criterios, junto con el peso de cada uno, a las diferentes alternativas y sus características técnicas, económicas y medioambientales, para poder finalizar con la mejor solución que satisfaga a todas las personas partícipes en las encuestas.

A continuación se va a proceder al estudio, diseño y elección del sistema híbrido renovable más adecuado para la zona aislada de Maniema. Para ello se va a estudiar, en un primer momento, el contexto actual en el que está inmerso el país, tanto social como económico, así como la cantidad y calidad de los recursos energéticos de los que este dispone, para poder abordar de una forma más sencilla el análisis del contexto energético en un escenario tendencial, teniendo en cuenta cómo ha ido avanzando el país en los últimos años para estimar como podrían ser los años venideros, y en un escenario propuesto, para poder encontrar mejoras a implementar en el país para un futuro energético más sostenible y accesible para todos. Por último, se entrará a fondo en la zona aislada de Maniema, para estudiar la demanda energética de la zona, los recursos energéticos de los que esta dispone para poder generar, en última instancia, las posibles instalaciones híbridas renovables que cumplirán con todo esto. En base a estas instalaciones generadas y con el objetivo de seleccionar la más adecuada, se procederá a evaluar mediante el método AHP cuál de todas ellas sería la más adecuada, en base a aspectos económicos, técnicos y medioambientales, teniendo en cuenta la ponderación de cada uno de estos aspectos.



Figura 6. Metodología del estudio

3.1 Contexto socio-económico de la República Democrática del Congo

La República Democrática del Congo es un país situado en el centro de África con más de 2 millones de kilómetros cuadrados de superficie y una población de 82 millones de habitantes, cuya capital y ciudad con más población es Kinsasa, con más de 11 millones de habitantes. Es el segundo país más extenso del continente africano y comprende una gran parte de la cuenca del río Congo, segundo río más caudaloso del mundo, hasta los grandes lagos. El país hace frontera con la República Centroafricana y Sudán del Sur al norte, Angola y Zambia al sur, la República del Congo al oeste y Burundi, Ruanda, Uganda y Tanzania al este. Cabe añadir que el país cuenta con 37 kilómetros de costa.



Figura 7. República democrática del Congo. Fuente: <https://es.zenit.org>

En cuanto a lo que económicamente se refiere, la República Democrática del Congo ha ido a pique desde 1980 con la Primera y Segunda Guerra del Congo, ya que ha incrementado mucho la deuda externa del país. Durante gran parte de la actualidad más reciente, la RDC ha sido el segundo país más pobre de África, con un PIB per cápita de unos 300\$. Todo esto ha sido empeorado por la falta de ayuda externa, debido al creciente conflicto y la dificultad de operar en un ambiente de este estilo. Cabe decir que las condiciones han ido mejorando a raíz del 2002, con misiones del FMI y del Banco Mundial, con planes para un desarrollo económico adecuado.

Pese a las ayudas crecientes, la mayor parte de la población vive en la pobreza, dicho en el informe de la ONU de 2011 sobre el IDH (Índice de Desarrollo Humano), donde se dijo que la República Democrática del Congo era el país más pobre del mundo.

Por otro lado, cabe destacar que la RDC es uno de los países con mayor riqueza natural del mundo, en cuanto a reservas de minerales y recursos naturales se refiere. Es uno de los mayores productores mundiales de cobalto, diamantes, cobre, oro y coltán. Sin embargo, gran parte de las explotaciones de recursos minerales en este país se producen de forma artesanal y a pequeña escala y, dentro del sector minero, muchos trabajadores se encuentran en situaciones semejantes a la esclavitud, haciendo que todo esto no contribuya al crecimiento económico del país.

El principal pilar económico del país es la agricultura, con cosechas como el café, aceite de palma, azúcar, cacao y otros. Sin embargo, pese al gran territorio del que dispone el país, gran parte de este es utilizado para actividades agrícolas de subsistencia.

Por lo que se refiere al clima de la República Democrática del Congo, un tercio del país se encuentra al norte del ecuador y dos tercios al sur. En general, el clima es cálido y húmedo en zonas cercanas al río, con temperaturas elevadas que no suelen descender de los 20 grados. También existen zonas de temperaturas frescas y secas en las tierras altas del sur, y zonas frías en la parte de las montañas de Ruwenzori. Las lluvias constantes a las que está sometido el ecuador terrestre hacen que al norte la estación de lluvias dure de marzo a finales de octubre, mientras que al sur del ecuador ocurre lo contrario. En el resto del año tenemos la estación seca.

Según la Constitución de 2005, el país está dividido en 26 provincias, en contra de las 10 en las que había estado dividido tradicionalmente.



Figura 8. Provincias de la República Democrática del Congo. Fuente: <https://www.wikiwand.com>

Por último, la zona de estudio en la que está centrada este trabajo de fin de grado es Maniema, cuya capital es Kindu, cuenta con 132.520 kilómetros cuadrados de superficie y un total de 1.246.787 habitantes. Maniema se encuentra en la parte este del país.



Figura 9. Provincia de Maniema. Fuente: <https://es.wikipedia.org>

3.2 Macro-análisis

Contexto energético

La República Democrática del Congo es un país cuyo principal potencial energético proviene de las energías renovables, en concreto de la energía hidráulica. El problema reside en que estas centrales de generación de electricidad solo suministran energía a grandes ciudades, lo que limita mucho la accesibilidad de electricidad a gran parte del país. De esta manera el gobierno se está centrando en realizar grandes esfuerzos para poder hacer llegar la electricidad a todo aquel que la necesite, sobre todo en el sector doméstico, que es donde más demanda hay y donde menos electrificación hay.

Debido a esto que se acaba de comentar, en el país hay una gran dependencia de la biomasa forestal. Más de un 90% de la demanda energética del país es cubierta con este recurso, utilizado en cocinas, iluminación, etc.

En las siguientes tablas que se van a mostrar se observa la situación energética del país, extraídas de la Agencia Internacional de la Energía.

	Carbón	Petróleo	Producto Petrolífero	Gas Natural	Nuclear	Hidro	Geoterminia, Solar, etc.	Biofuel y residuo	Electricidad	Calor	TOTAL
Producción	0	1003	0	0	0	782	0	28211	0	0	29996
Importación	0	0	779	0	0	0	0	0	2	0	781
Exportación	0	-1003	0	0	0	0	0	0	-36	0	-1039
Bunker Marinos Internacional	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bunkers Aviáticos internacional	0	0	-123	0	0	0	0	0	0	0	-123
Modificación de Stock	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TPES	0	0	656	0	0	782	0	28211	-34	0	29615

Tabla 3. Energía primaria en RCD. Fuente: Propia

Aquí se puede ver como la biomasa y los residuos, en su mayoría agrícolas, son los más abundantes en cuanto a producción de energía primaria, esto muestra la dependencia del país a este recurso. Esto queda plasmado en la siguiente tabla y gráfica.

Consumo 2016 (ktep)							
SECTOR	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas Natural	Renovables	Nuclear	Total
Industria	331	0	0	0	3169	0	3500
Transporte	0	0	628	0	0	0	628
Servicios	61	0	0	0	0	0	61
Doméstico	210	0	1	0	17510	0	17721
Agric. Y Pesca	1	0	0	0	0	0	1
Gen. Electricidad	-	0	3	0	856	0	859

Total fuente	603	0	632	0	21535	0	21204
---------------------	-----	---	-----	---	-------	---	-------

Tabla 4. Consumo de energía final en 2016. Fuente AIE

Tal y como se ha comentado anteriormente, el consumo de electricidad es muy bajo, por lo que se observa que el grado de electrificación del país es muy bajo y que la gran parte del consumo de energía final proviene de las energías renovables, en concreto de la biomasa forestal. En el siguiente gráfico se ve con más claridad.

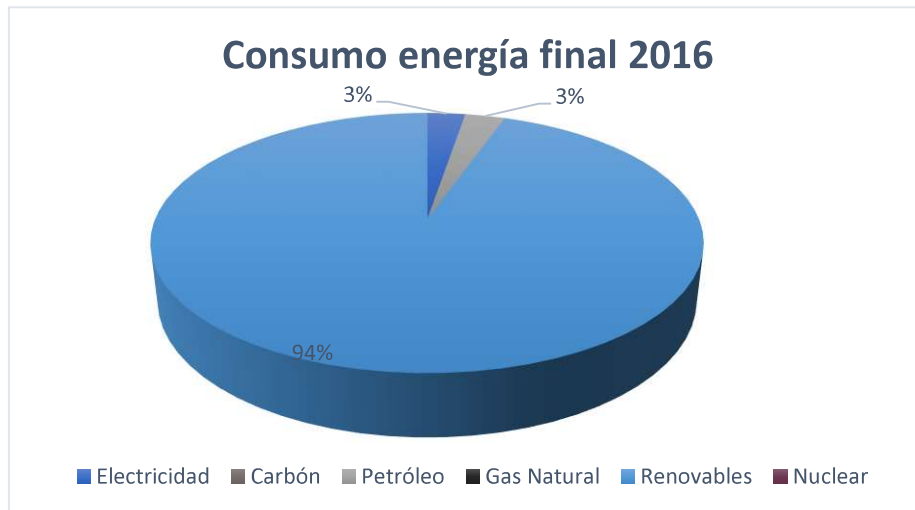


Figura 10. Porcentaje por fuente en consumo final. Fuente: Propia.

3.2.1 Escenario tendencial

Antes de especificar cuál ha sido la metodología que se ha implementado para llevar a cabo un escenario energético tendencial de la República Democrática del Congo, cabe decir que un escenario es una herramienta de carácter especulativo mediante la que se pretende obtener una aproximación sobre los posibles escenarios futuros, para poder localizar problemas y las estrategias a seguir para evitar que esto se pueda producir. Por ello, mediante el uso de datos del pasado se obtienen una serie de tendencias que son alargadas en el tiempo para el fin de nuestro objetivo, que es obtener una aproximación futura en base a lo que el país ha ido viviendo a lo largo de los años.

La metodología utilizada para la ejecución del escenario tendencial ha sido el escenario BAU (Business As Usual), que suele ser el escenario más habitual. En este escenario no se introduce ningún cambio con respecto a los años anteriores y, como se ha comentado anteriormente, se hace uso de las tendencias energéticas que el país ha vivido en cada uno de sus sectores para mantenerlas en el futuro. Se trata de un escenario que a corto plazo tiene una alta probabilidad de cumplirse, pero que a largo

plazo, debido factores que pueden intervenir de forma espontánea, es más improbable que se mantenga.

El primer paso para generar el escenario BAU, será obtener las tendencias para cada sector. Para ello se ha extraído de la Agencia Internacional de la Energía datos en kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep) de energía final consumida de cada uno de los sectores desde el año 1990 hasta el 2016, ya que no hay datos más recientes.

Año	Industrial	Transporte	Servicios	Doméstico	Agric. Y Pesca
1990	2301	194	0	7699	1
1991	2174	164	0	7896	1
1992	2243	150	0	8154	1
1993	2323	151	0	8428	1
1994	2374	155	0	8656	1
1995	2451	155	0	8924	1
1996	2527	156	0	9202	1
1997	2605	154	0	9494	1
1998	2686	156	0	9798	1
1999	2761	149	0	10151	1
2000	2884	263	121	10399	0
2001	3000	215	122	10790	0
2002	3172	230	39	11163	0
2003	3299	273	29	11559	0
2004	3407	297	19	11970	0
2005	3535	369	20	12400	0
2006	3632	397	21	13919	0
2007	3833	443	16	13295	0
2008	3948	502	16	13737	0
2009	4097	502	18	14225	0
2010	4123	549	17	14401	0
2011	4358	703	18	15193	0
2012	3115	699	105	12723	0
2013	3180	1094	113	14666	0
2014	3371	1490	69	16583	0

2015	3421	881	64	17138	0
2016	3521	628	61	17721	0

Tabla 5. Consumo de energía final por sector y año. Fuente: AIE

De esta manera podemos obtener la tendencia que sigue cada sector y sacar un porcentaje de variación anual para aplicarlo a nuestro escenario tendencial.

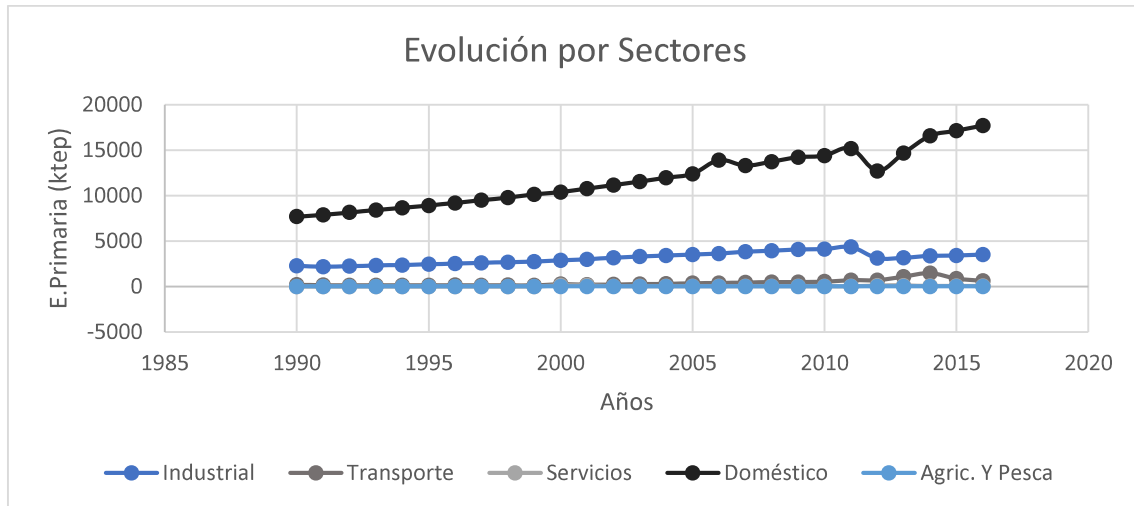


Figura 11. Evolución del consumo de energía final por sector. Fuente: Propia.

El porcentaje de variación anual de cada sector se saca mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Ritmo de crecimiento} = \left(\frac{\text{Presente}}{\text{Pasado}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Donde “presente” hace referencia al consumo de energía final del sector en estudio en el presente (en nuestro caso 2016), “pasado” hace referencia al consumo de energía final del sector en estudio en el pasado (en nuestro caso 1990) y “n” hace referencia al número de años entre cada periodo de tiempo.

Con ello, obtenemos los siguientes ritmos de crecimiento o tendencias para cada sector:

- **Sector industrial:** 1.6%
- **Sector transporte:** 4.4%
- **Sector servicios:** 63.8%
- **Sector doméstico:** 3.1%
- **Sector de agricultura y pesca:** -100%

De estos valores obtenidos se han corregido el de sector servicio debido a que sale un valor muy elevado producido porque el consumo en 1990 era de 0ktep, cogiendo como valor útil y aceptable un 1%, y el sector de agricultura y pesca debido a que pasa de 1ktep a 0ktep de 1990 a 2016, cogiendo como valor útil y aceptable un 0%.

De la misma manera que esto va a ser útil para el escenario BAU, también lo va a ser la obtención de datos y tendencias de la población y del PIB de la República Democrática del Congo, tanto para el BAU como para el escenario propuesto que se va a llevar a cabo más adelante.

Año	Población	PIB (billion 2010 USD)
1990	35	23,00
1991	36	21,00
1992	37	19,00
1993	39	16,00
1994	40	16,00
1995	42	16,00
1996	43	16,00
1997	44	15,00
1998	45	15,00
1999	46	14,00
2000	47	13,00
2001	48	13,00
2002	50	13,00
2003	51	14,00
2004	53	15,00
2005	55	16,00
2006	57	17,00
2007	58	18,00
2008	60	19,00
2009	62	19,00
2010	65	21,00
2011	67	22,00
2012	69	24,00
2013	71	26,00

2014	74	28,00
2015	76	30,00
2016	79	31,00

Tabla 6. Datos de población y PIB de la RDC. Fuente: AEI.

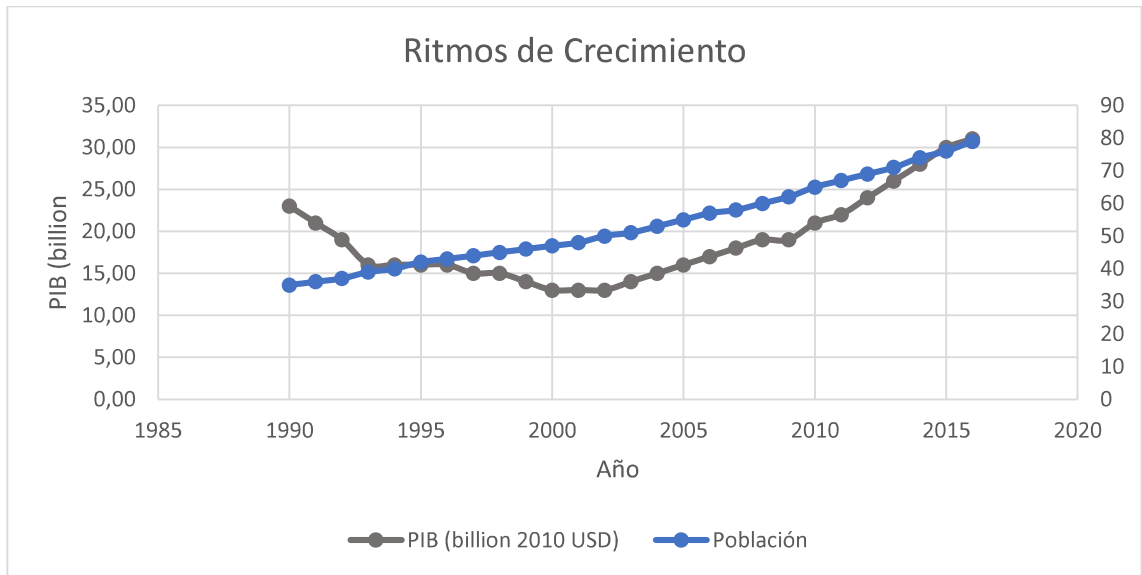


Figura 12. Evolución de la población y el PIB. Fuente: Propia.

Con ello obtenemos los siguientes ritmos de crecimiento para la población y el

PIB:

- **Población:** 3.1%
- **PIB:** 1.1%

Con todos estos datos, para poder empezar con la resolución del escenario tendencial, se van a insertar los datos de consumo de cada sector en función de la fuente energética del año 2016 para, posteriormente, mediante los ritmos de crecimiento llegar a obtener como sería el escenario energético de la República Democrática del Congo en el año 2030.

SECTOR	Ud.	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear	Total
Industria	ktep	331	0	0	0	3.169	0	3.500
	%	9	0	0	0	91	0	-
Transporte	ktep	0	0	628	0	0	0	628
	%	0	0	100	0	0	0	-
Servicios	ktep	61	0	0	0	0	0	61
	%	100	0	0	0	0	0	-
Doméstico	ktep	210	0	1	0	17.510	0	17.721
	%	1	0	0	0	99	0	-
Agric. Y Pesca	ktep	1	0	0	0	0	0	1
	%	100	0	0	0	0	0	-
Gen. Electricidad	ktep	-	0	3	0	856	0	859
	%	-	0	0	0	100	0	-

Tabla 7. Consumo de energía por sectores y fuente en 2016. Fuente: AIE

De esta manera, al aplicar los ritmos de crecimiento calculados anteriormente sobre estos valores de consumo de energía por sectores y fuentes energéticas en 2016, se obtienen los siguientes valores para el año 2030.

SECTOR	Ud.	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear	Total
Industria	ktep	413	0	0	0	3.951	0	4.364
	%	9	0	0	0	91	0	-
Transporte	ktep	0	0	1.155	0	0	0	1.155
	%	0	0	100	0	0	0	-
Servicios	ktep	70	0	0	0	0	0	70
	%	100	0	0	0	0	0	-
Doméstico	ktep	324	0	2	0	26.979	0	27.304
	%	1	0	0	0	99	0	-
Agric. Y Pesca	ktep	1	0	0	0	0	0	1
	%	100	0	0	0	0	0	-
Gen. Electricidad	ktep	-	0	4	0	1.163	0	1.168
	%	-	0	0	0	100	0	-

Tabla 8. Consumo de energía por sectores y fuente en 2030, escenario tendencial. Fuente: Propia.

Como síntesis de este escenario tendencial se puede observar como el sector doméstico es el que más ha aumentado, sobretodo en cuanto a consumo de energías renovables se refiere. El resto de sectores se mantiene en un rango aproximadamente semejante a los valores obtenidos en 2016. En conclusión, se siguen utilizando las renovables como fuente principal de energía en el sector doméstico, como ya se ha comentado en el contexto del país, con el uso de la biomasa para cocinar, calentar, etc. Esto es debido a que se está hablando de un escenario tendencial y, por tanto, cabe esperar este escenario futuro en 2030. En las siguientes gráficas queda plasmada esta conclusión.

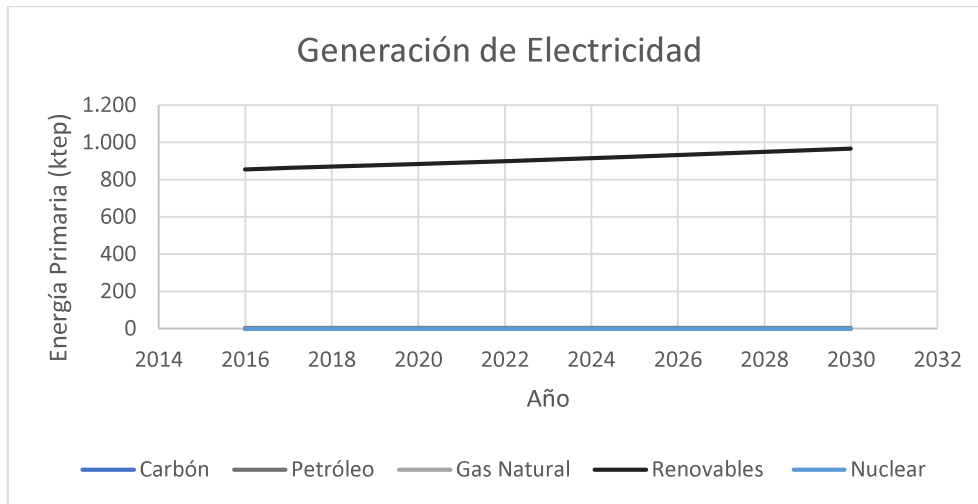


Figura 13. Generación de electricidad por fuente. Fuente: Propia.

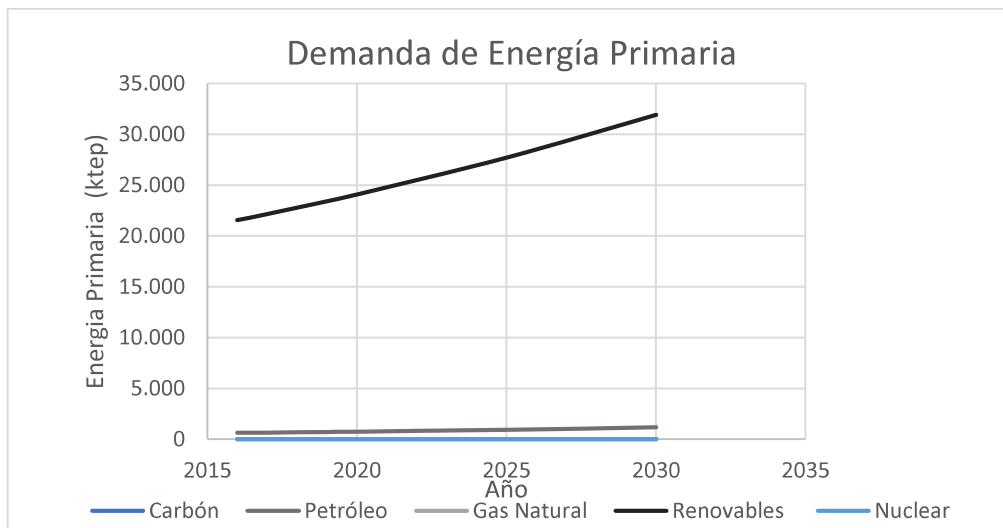


Figura 14. Demanda de energía por fuente. Fuente: Propia.

3.2.2 Escenario propuesto

El escenario propuesto consiste en romper con las tendencias del escenario tendencial e introducir una serie de propuestas, variables y cambios que modifiquen esto. Para ello será necesario definir un problema y tomar unas decisiones para solventarlo. En el escenario tendencial se han definido una serie de efectos negativos futuros producidos por los ritmos de crecimiento constantes, por tanto, se va a crear un escenario futuro en el que se puedan corregir los problemas energéticos y ver la situación a la que se puede llegar en el país.

Los objetivos del nuevo escenario están basados en la electrificación del país, ya que la mayoría de hogares utilizan como fuente de energía la biomasa forestal para generar todo aquello que necesitan. De esta manera, mediante una electrificación más generalizada, se podrán conseguir unas mejores condiciones de vida y un mayor

desarrollo. El **objetivo marcado es conseguir para el año 2030 un 80% de electrificación**, mediante la generación de una mayor cantidad de electricidad y mediante la reducción del uso de renovables en hogares en detrimento del aumento del consumo eléctrico en estos.

Según el Banco Mundial, el grado de electrificación de la República Democrática del Congo en el año 2016 es del 17,1% con una generación de electricidad de 859ktep y una población de 79 millones de habitantes. De esta manera, si se tuviera una población de 79 millones de habitantes en el año 2030, sería necesario generar 4018,7ktep para lograr el 80% de grado de electrificación. Sin embargo, haciendo uso de los ritmos de crecimiento, se prevé que para el año 2030, la población ascenderá a 120,5 millones de habitantes, por tanto, será necesario generar 7662,26ktep para lograr el objetivo propuesto del 80%.

SECTOR	Ud.	Electricidad	Carbón	Petróleo	Gas natural	Renovables	Nuclear	Total
Industria	ktep	1.203	0	0	0	3.161	0	4.364
	%	28	0	0	0	72	0	-
Transporte	ktep	0	0	1.155	0	0	0	1.155
	%	0	0	100	0	0	0	-
Servicios	ktep	70	0	0	0	0	0	70
	%	100	0	0	0	0	0	-
Doméstico	ktep	3.832	0	2	0	23.471	0	27.304
	%	14	0	0	0	86	0	-
Agric. Y Pesca	ktep	1	0	0	0	0	0	1
	%	100	0	0	0	0	0	-
Gen. Electricidad	ktep	-	0	27	0	7.631	0	7.658
	%	-	0	1	0	99	0	-

Tabla 9. Consumo de energía por sectores y fuente en 2030, escenario propuesto. Fuente: Propia

Tal y como se observa en la tabla 9, se ha conseguido llegar al objetivo de aproximadamente un 80% de grado de electrificación, mediante una generación de electricidad de 7658ktep. Las medidas que se han llevado a cabo han sido tanto en la industria como en el sector doméstico, dado que son los sectores que más demanda tienen y en los que más margen hay a la hora de introducir medidas, ya que de ellos va a depender en gran medida el grado de desarrollo del país y las condiciones de vida de sus habitantes. Tanto la industria como el sector doméstico dependían de las fuentes de energía renovable, por tanto, lo que se ha hecho ha sido la sustitución de un 20% de lo generado con fuentes renovables por electricidad en el sector industria por año y la sustitución de un 13% de lo generado por año con renovables en el sector doméstico por electricidad.

3.2.3 Comparativa de escenarios

El principal objetivo que se ha perseguido a la hora de generar el escenario propuesto era incrementar la generación de electricidad para conseguirla hacer llegar a más zonas del país. En este caso, lo que se pretendía era conseguir un grado de electrificación del 80% para incrementar el grado de desarrollo de la población. Mediante el escenario energético propuesto se ha conseguida pasar en el año 2030 de 1.168ktep a 7.658ktep de generación de electricidad, consiguiendo cumplir con el objetivo marcado de hacer llegar la electricidad a la cantidad de población fijada en los apartados anteriores.

3.3 Micro-análisis en un caso concreto

A continuación, se analiza la viabilidad de introducir las energías renovables como principal fuente de suministro eléctrico a pequeña escala. Para ello, se ha seleccionado el poblado de Maniema, como caso concreto de aplicación.

3.3.1 Caracterización de la demanda

Como se ha dicho anteriormente, la zona en la que se va a realizar el estudio y análisis comparativo de configuraciones de sistemas renovables es Maniema, en concreto va a ser la población de Imonga, cuya población pertenece al territorio de

Kabambare, en la zona sur de Maniema. Esta población cuenta con 4755 habitantes y un total de 476 hogares.

Para la caracterización de la demanda se van a tener en cuenta dos perfiles diferentes, uno para los días laborables o entre semana y otro para el fin de semana o días festivos. Aparte de los 476 hogares mencionados anteriormente también se van a tener en cuenta los distintos comercios y la potencia demandada por ellos junto con su consumo diario.

Comercio	Potencia (kW)	Consumo (kWh)	Cantidad
Molino	40	240	2
Desgranadora de arroz	80	480	2
Matadero	10	50	1
Cámara frigorífica	120	2880	1
Bomba de agua	50	300	1
Pequeños artesanos	30	210	10

Tabla 10. Demanda de comercios. Fuente: Atlas de energías renovables de la RDC

En cuanto a los hogares, se va a estimar el consumo de cada uno de estos, teniendo en cuenta que se dispone de pocos ingresos y que utilizan biomasa forestal para gran parte de las actividades del hogar, como cocinar. Para ello se va a tener en cuenta el uso de bombillas para la iluminación, radio, ventiladores y televisores, suponiendo una potencia de aproximadamente 120 W por hogar.

Por otro lado, según el “Atlas de energías renovables de la RDC”, se estima que la potencia del alumbrado público de la población es de aproximadamente 20,16 kW.

Una vez introducidas en el software HOMER las demandas, se considera un 10% de variabilidad de esta, ya que no se puede asegurar que todos los días se tenga la

misma demanda global. Con esto, se obtiene un pico de potencia de 1032kW.

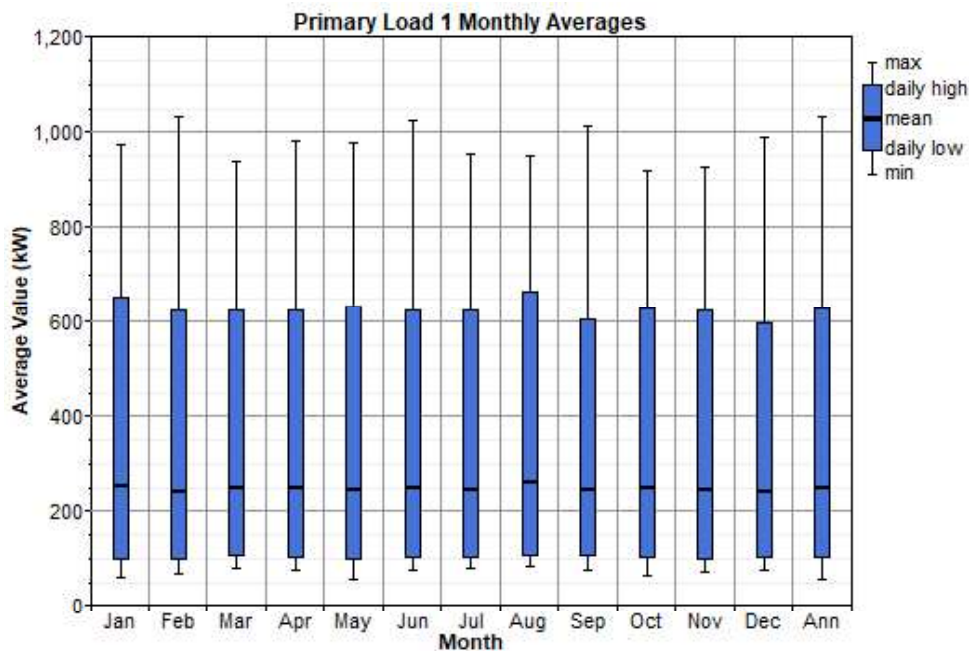


Figura 15. Demanda a lo largo de año. Fuente: HOMER

En este gráfico se observa de forma más sencilla los máximos y mínimos de demanda, incluyendo los picos de esta debido al 10% introducido de variabilidad. Se puede observar como los meses de junio y febrero son donde se encuentran los picos de demanda máxima, de unos 1050kW, mientras que octubre presenta el pico más bajo, de aproximadamente 930kW.

3.3.2 Recursos energéticos

Como anteriormente se ha comentado, la zona de estudio va a ser la población de Imonga, en el territorio de Kabambare, por tanto, en el apartado actual se van a analizar los recursos energéticos existentes en la zona, para conseguir, con ello, conocer el potencial de la zona y poder seleccionar las tecnologías más adecuadas.

3.3.2.1 Radiación solar

En apartados anteriores se ha comentado que una de las tecnologías a utilizar en la instalación son las placas fotovoltaicas, por tanto, necesitamos saber la radiación solar de la que dispone la zona de estudio con el fin de poder realizar las simulaciones pertinentes que permitan conocer cómo sacar el máximo partido de este recurso energético. Para ello también habrá que conocer el índice de claridad. Puesto que la zona de Maniema cuenta con un gran potencial de energía solar, se espera obtener buenos datos sobre este recurso, a fin de poder obtener de este una gran cantidad de energía.

Mes	Radiación diaria (Wh/m ² /día)	Índice de claridad
Enero	4600	0,457
Febrero	5130	0,494
Marzo	5710	0,543
Abril	5280	0,517
Mayo	5360	0,555
Junio	5350	0,575
Julio	5240	0,556
Agosto	5360	0,541
Septiembre	5230	0,506
Octubre	5060	0,488
Noviembre	4640	0,46
Diciembre	4420	0,446

Tabla 11. Radiación solar e índice de claridad en Imonga. Fuente: PVGIS

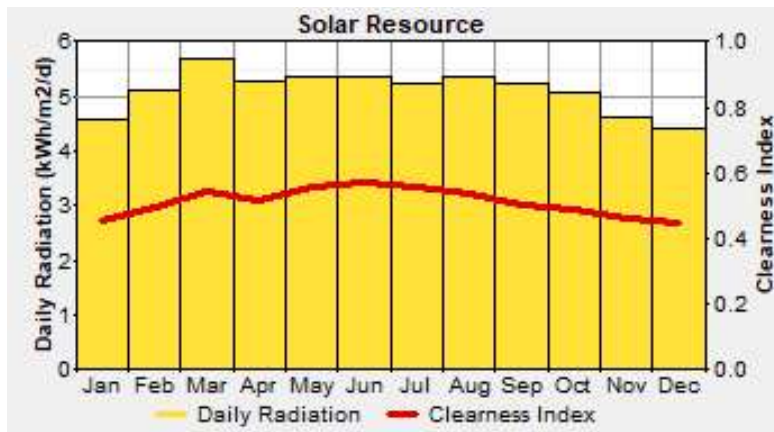


Figura 16. Radiación solar diaria e índice de claridad en Imonga. Fuente: HOMER

De estos datos introducidos en HOMER, se obtiene como media anual de radiación solar un valor de 5115Wh/m²/día y como media anual de índice de claridad un valor de 0,511.

3.3.2.2 Viento

Otro de los recursos a tener en cuenta es el viento, del que necesitamos conocer valores medios de su velocidad por mes para poder decidir si va a valer la pena o si va a ser aprovechada una instalación eólica. Estas medidas sobre la velocidad media del viento deben ser medidas a unos 10 metros de altura cada 5 minutos para tener una validez. Valores habituales para que un aerogenerador nos genere electricidad rondan entorno a velocidades del viento de entre 3m/s y 5m/s, entregando la potencia nominal aproximadamente a unos 13m/s, mientras que a velocidades superiores a 25m/s el sistema de frenado del aerogenerador debe parar el giro de las hélices por razones de seguridad.

Mes	Velocidad media del viento (%)
Enero	1,9
Febrero	2,1
Marzo	2,1
Abril	2,3
Mayo	2,7
Junio	3
Julio	3

Agosto	3,1
Septiembre	2,8
Octubre	2,6
Noviembre	2,1
Diciembre	1,9

Tabla 12. Velocidad media del viento por mes en Imonga. Fuente: Enair

Por lo que se ha comentado anteriormente respecto a la necesidad de una velocidad media del viento mínima para un buen rendimiento y una buena producción de electricidad, se observa que los valores de velocidad media del viento obtenidos de la zona de Imonga son bastante bajos, obteniendo como conclusión que, pese a que se tienen valores pequeños, se van a considerar estos a la hora de intentar incluir en la instalación global una instalación eólica, ya que tenemos meses con velocidades muy cercanas a 3m/s y algún mes que la supera, obteniendo una media de 2,4m/s anual.

Otro dato que habrá que tener en cuenta a la hora de instalar el aerogenerador es la procedencia del viento, es decir, cuál es la dirección en la que sopla el viento la mayor parte del año. Esto se muestra con la Rosa de los Vientos.

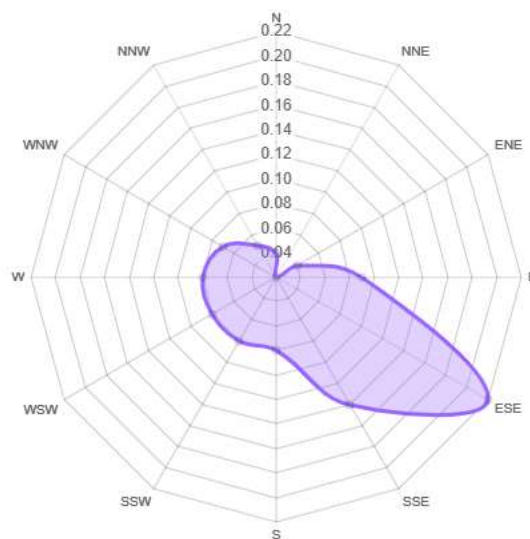


Figura 17. Rosa de los vientos de Imonga. Fuente: Enair

De esta imagen se puede concluir que la dirección predominante desde la que sopla el viento es la este-sudeste, dirección a la que deberán orientarse los aerogeneradores.

3.3.2.3 Recurso hidráulico

La República Democrática del Congo está bañada por el río Congo, uno de los ríos más largos del mundo y uno de los más caudalosos. En su curso más alto, el río se denomina río Lualaba, que recibe su caudal del Lufira, Luvua, Lukuga, Luama y Ulindi. Nuestra zona de estudio, Imonga, está bañada por uno de estos afluentes, el Luama, del que no hay información detallada, pero sí se sabe que es similar al río Lukuga, cuyo caudal sí que es conocido. El río Lukuga cuenta con una longitud de 350km, una superficie de cuenca de 270900km² y un caudal de 271m³/s. De esto modo, considerando la similitud entre el Luama y el Lukuga, se va a tomar el dato de caudal de 271m³/s como válido para el río que es de interés, el Luama. Como no se puede asegurar que este caudal sea constante a lo largo del año, se va a considerar una variación del $\pm 10\%$, variando desde mínimos de 243,9m³/s, hasta máximos de 298,1m³/s.

Por otro lado, la lluvia es otro recurso importante a tener en cuenta dentro del recurso hidráulico. Sobre la lluvia ya se ha comentado que, al sur del ecuador, la época de lluvias va de octubre a marzo, luego en este periodo es donde se van a encontrar las precipitaciones mayoritarias.

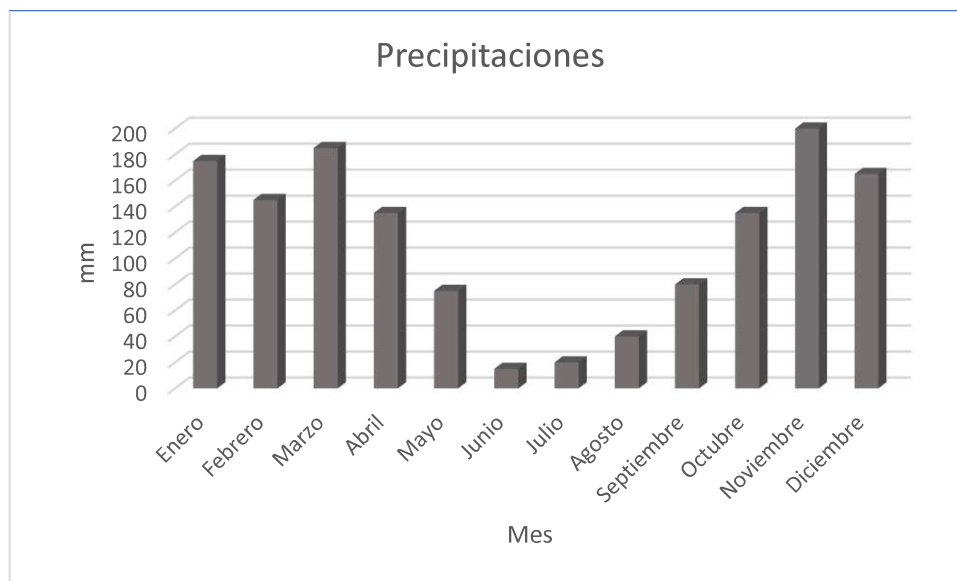


Figura 18. Precipitaciones en Imonga. Fuente: <https://es.climate-data.org>.

3.3.2.4 Biomasa

La República Democrática del Congo es uno de los países en el que se encuentra una gran parte de la selva del Congo, que ocupa una enorme región de África Central. Se trata de un bosque húmedo tropical que se extiende por la cuenca del río Congo. Es el segundo bosque más amplio del mundo, ocupando 700000km², por tanto, teniendo

en cuenta la gran cantidad de biomasa que se puede producir a partir de este, se va a considerar como recurso y combustible para el gasificador el uso de esta biomasa forestal. Se estima que se puede producir en torno a 5 millones de toneladas de biomasa forestal al mes, debido a la gran extensión de bosque, de las que se espera obtener 15 toneladas al mes para uso de combustible en el gasificador.

- **Poder calorífico:** 19MJ/kg
- **Contenido en carbono:** 45%
- **Precio:** 150\$/t

3.3.2.5 Diésel

Pese a no ser un recurso renovable, el diésel es necesario en los momentos en los que no se puede generar la electricidad demandada por el usuario. Esto puede ser debido a la falta de producción de la tecnología renovable por falta de recursos (como podría ser la falta de producción de un panel fotovoltaico en un día lluvioso) o, también, por la necesidad de cubrir un pico de demanda al que no se puede llegar solo con la tecnología renovable. En estos casos será necesaria la utilización de un generador diésel, cuyo combustible vamos a considerar con estas características:

- **Poder calorífico inferior:** 43,115MJ/kg
- **Densidad:** 850kg/m³
- **Precio:** 1,36\$/l

3.3.3 Equipos seleccionados

En este apartado se van a exponer los diferentes elementos que van a formar parte de la instalación con el fin de poder satisfacer la demanda de la población a partir de los datos introducidos de esta y de los recursos energéticos existentes.

3.3.3.1 Paneles fotovoltaicos

Para la instalación de los paneles fotovoltaicos hay que tener en cuenta diferentes detalles. La zona de estudio considerada se encuentra en el hemisferio sur, luego los paneles deberán ir orientados al norte, con una inclinación óptima de 6 grados para así obtener el máximo rendimiento de la instalación. La orientación óptima ha sido obtenida a través de PVGIS.

Una vez obtenidos estos datos relacionados con la instalación de los paneles, se va a proceder a hacer una selección de estos. Con el fin de poder obtener diferentes soluciones y que HOMER pueda realizar diversas iteraciones, se van a considerar

potencias de 10, 20, 50, 100, 200 y 300kW en la instalación. Para realizar dicha instalación se han escogido paneles de potencia 200W con un coste por unidad de 187,60€. También se va considerar el caso en el que no sea necesaria la instalación de paneles fotovoltaicos.

Para introducir todos estos datos en HOMER también es necesario conocer el total de costes de inversión, los costes de reemplazo en caso de avería y los costes de operación y mantenimiento que se puedan realizar a lo largo del año. Esta información va a ser obtenida a través del Instituto Valenciano de la Edificación, del que se obtienen los siguientes valores sobre los costes de una instalación fotovoltaica:

Potencia (kW)	Costes de inversión (€)	Costes de reemplazo (€)	Costes de operación y mantenimiento (€/año)
10	11.134	10.914	1.534
20	22.266	21.828	3.068
50	55662	54570	7670
100	111325	109140	15340
200	222650	218280	30680
300	333975	327.420	46020

Tabla 13. Costes de la instalación fotovoltaica. Fuente: Propia.

3.3.3.2 Aerogenerador

Para la instalación de un aerogenerador con el fin de aprovechar el viento existente en la zona de estudio va a ser necesario el conocimiento de la curva de potencia de la tecnología elegida y los costes, tanto de inversión, de reemplazo y de mantenimiento, como ya se ha hecho en el apartado anterior.

El aerogenerador que se va a tener en cuenta a la hora de realizar la instalación va a ser el aerogenerador E200L de Enair, ya que el recurso eólico de la zona tiene una media de velocidad del viento de 2,4m/s. Este aerogenerador empieza a producir rotación en sus palas con vientos del orden de 1,85m/s, dato que ha hecho que este aerogenerador sea suficientemente bueno en el caso de estudio. Otros datos técnicos son su diámetro de 10 metros y su corte de producción con vientos del orden de 30m/s.

La curva de potencia del aerogenerador en cuestión es la siguiente:

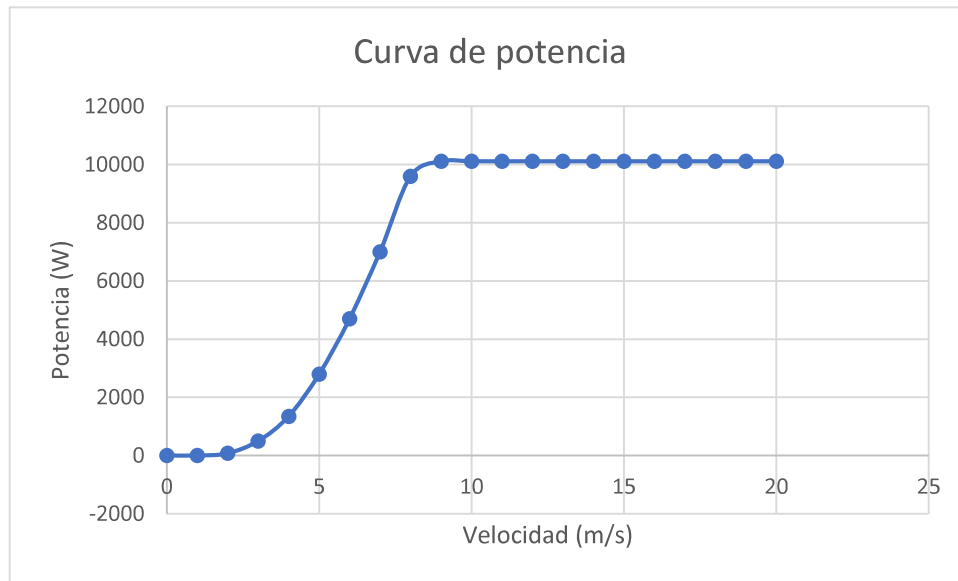


Figura 19. Curva de potencia del aerogenerador. Fuente: Enair

Una vez obtenida la potencia del aerogenerador, se va a pasar a estudiar los costes de la instalación. Cabe decir que Enair no proporciona datos sobre este aerogenerador en cuanto a precios se refiere, luego se va a hacer uso del PER. El aerogenerador, según el PER, tiene un precio aproximado del 75% de la instalación, tomando como valor 980€/kW, lo que nos da un precio para nuestro aerogenerador de 9.800€. Este precio es por cada uno que se instale, pero para obtener un mayor número de iteraciones, se van a introducir en HOMER consignas para que este puede elegir entre poner uno, dos, tres, cuatro, cinco o ninguno. Por otro lado, siguiendo con los datos de coste de inversión, el PER estima un coste de 1307€/kW, lo que supone para la instalación un coste de 13070€ por aerogenerador. Por último, los costes de mantenimiento rondan los 50€/kW. De esta forma, así quedarían los costes de la instalación eólica:

Potencia (kW)	Costes de inversión (€)	Costes de reemplazo (€)	Costes de operación y mantenimiento (€/año)
---------------	-------------------------	-------------------------	---

10	13.070	9.800	500
----	--------	-------	-----

Tabla 14. Costes de la instalación eólica. Fuente: Propia.

3.3.3.3 Turbina hidráulica

Dado que en la zona de estudio se tiene un río con un caudal medio bastante elevado, se va a considerar para la instalación una turbina que sea capaz de aceptar un caudal elevado, pero con poco salto de altura, debido al terreno sobre el que se sitúa el río. De este modo, se ha elegido una turbina Kaplan, ya que este tipo de turbinas aceptan caudales de unos 10m³/s en adelante y saltos de altura pequeños.

A continuación, para reflejar los detalles mencionados y poder introducirlos en HOMER, es necesario conocer el caudal de diseño de la turbina, el rendimiento, el salto de agua disponible y datos de costes de inversión, reemplazo y mantenimiento. Según el PER, el coste de inversión para centrales hidroeléctricas es de 1.620.000€/MW para centrales de menos de 10MW y el coste de operación y mano de obra ronda los 50€/kW. También se observa en el PER que el coste de la turbina supone un 30% del coste total de la inversión. Por último, se va a tomar un rendimiento del 86%, un salto de altura de 5 metros y un caudal de diseño de 10m³/s, ya que el río que es caso de estudio para esta tecnología tiene un caudal medio de 271m³/s, dejando gran parte de este fluir por su lecho, aprovechando el restante en la turbina.

Con todo esto, obtenemos los siguientes datos:

Potencia (kW)	Costes de inversión (€)	Costes de reemplazo (€)	Costes de operación y mantenimiento (€/año)
422	683.640	205.092	21.100

Tabla 15. Costes de la central hidráulica. Fuente: Propia

3.3.3.4 Gasificador de biomasa

EL gasificador es en sí un generador, luego en el software hay que indicar que se trata de un generador. Para diferenciarlo de cualquier otro generador como podría ser el generador diésel, cabe indicar que el generador va a ser alimentado con biomasa. De este modo ya se tiene en HOMER el generador de biomasa o, en este caso, el gasificador de biomasa.

Para el caso de estudio, se ha comentado anteriormente que debido a la cantidad de bosque existente en la zona y la cantidad de biomasa forestal que se puede obtener de este en forma de residuos forestales, se pueden conseguir grandes cantidades de

este recurso, luego se pueden instalar potencias medianamente elevadas. De este modo, se van a considerar para la instalación, potencias de 100, 200 y 300kW.

Según la web IRENA, el coste por kW de un gasificador está en torno a 3000€/kW, mientras que el coste total de la instalación es de 6000€/kW. Por otro lado, los costes de operación y mantenimiento son del 5% de los costes totales, que supondría por hora un total de 1€.

Todo esto queda de la siguiente forma:

Potencia (kW)	Costes de inversión (€)	Costes de reemplazo (€)	Costes de operación y mantenimiento (€/año)
100	600.000	300.000	1

Tabla 16. Costes del gasificador de biomasa. Fuente: Propia.

3.3.3.5 Generador diésel

La incorporación de un generador diésel va a ser necesaria para algunas alternativas de instalación en las que haya un pico de demanda y no se puede llegar a cubrirla solo con la tecnología renovable. De este modo, al introducir los datos en el software, se va a indicar que solo se haga uso de este tipo de tecnología en caso estrictamente necesario, es decir, introduciendo la opción de que el generador trabaje de forma óptima.

Como generador diésel se ha escogido el grupo electrógeno modelo 4B3.9-G, de 20kW de potencia de Cummins, con un precio de 6.672,90€. Con esto, se va a introducir en HOMER que se pueda hacer uso de uno, dos, tres o ningún generador diésel, para tener cierta holgura y movilidad, obteniendo potencias de 20, 40 o 60kW. Por otro lado, hay que indicar los costes de operación y mantenimiento del generador, que se estiman que pueden ser de unos 2€/h de funcionamiento del grupo electrógeno.

3.3.4 Equipos auxiliares

Para poder completar la introducción de datos y tecnologías en el software será necesario incluir el conjunto de baterías para el sistema de almacenamiento y el inversor, necesario para convertir la corriente continua de los módulos fotovoltaicos a corriente alterna.

3.3.4.1 Baterías

Como se ha comentado anteriormente, la zona de estudio es una zona aislada, luego, en caso de tener excedente de electricidad será necesario disponer de un sistema de almacenamiento que se encargue de retenerla para poder usarla en otro momento del día en el que la producción de electricidad no pueda cubrir la demanda.

En el software utilizado para este trabajo se encuentran una serie de opciones disponibles de diferentes modelos de baterías, de las que se dispone de la información necesaria. De entre todas las que hay disponibles se ha escogido el modelo Surrette 4KS25P, del que se tiene la siguiente información:

- **Capacidad nominal:** 1900Ah
- **Voltaje nominal:** 4V
- **Eficiencia:** 80%
- **Mínimo estado de carga:** 40%
- **Vida:** 12 años
- **Máxima corriente de carga:** 67,5 A

Los datos que hay que introducir en el software sobre estas baterías es: el precio, que se sitúa en 1200€ por unidad, y el precio de operación y mantenimiento que es de unos 15€/año. Por último, para que HOMER tenga una cantidad amplia de opciones sobre las que iterar, se van a introducir entre 0 y 400 baterías, en grupos de 50.

3.3.4.2 Inversor

Como último elemento a introducir en el software se tiene el inversor, que como ya se ha comentado se encarga de convertir corriente continua en alterna. Para introducir este aparato electrónico, será necesario conocer la potencia y los costes de éste.

Como hipótesis a seguir, se van a introducir potencias de inversor de 50, 100, 200 y 300kW, considerando también la no utilización de inversor en caso de ser necesario. Como inversor se ha tomado el inversor Growatt de 50kW, con un precio de 3719,10€. El precio de operación y mantenimiento es de 20€/año.

3.4 Método AHP

Finalmente, se aplica el método AHP para identificar cuál de las soluciones técnicamente viables es la más prometedora para el caso concreto de Maniema.

3.4.1 Alternativas

En el siguiente apartado se van a comentar las principales alternativas obtenidas para dar solución al problema propuesto en el trabajo.

3.4.1.1 Configuración 1: Hidráulica y baterías.

La primera configuración propuesta consta únicamente de una turbina hidráulica, baterías para almacenar energía cuando la demanda sea menor a la producción de la turbina hidráulica y un inversor para transformar la corriente alterna producida por la turbina en corriente continua, lista para ser almacenada en las baterías.

Se ha escogido esta opción para remarcar que en la zona de estudio existe mucho recurso hidráulico, del que se puede obtener una gran cantidad de energía, suficiente como para poder cubrir de una forma adecuada la demanda durante gran parte de año. También cabe destacar que se trata de una energía de producción constante a lo largo del año.



Figura 20. Producción mensual de electricidad. Fuente: HOMER

De este modo, la configuración quedaría del siguiente modo:

- Turbina hidráulica de 422kW
- 300 baterías Surrette 4KS25P
- Inversor de 200kW

Component	Initial	Annualized	Annualized	Annual	Annual	Total
	Capital	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Annualized
	(\$)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
Hydro	683,640	53,479	0	21,100	0	74,579
Battery	360,000	28,162	24,121	4,500	0	56,782
Converter	14,876	1,164	395	80	0	1,639
Totals	1,058,516	82,804	24,516	25,680	0	133,000

Figura 21. Resumen costes configuración 1. Fuente: HOMER.

En la figura anterior se observan, de forma desglosada, los diferentes costes de la instalación en función del componente de esta.

Ahora, lo que se trata es de analizar la configuración desde los puntos de vista económico, técnico y medioambiental, ya que es la parte que interesa del análisis de resultados para poder llegar a concluir cuál de todas las alternativas va a ser la más adecuada. En cuanto a los aspectos económicos de interés se obtiene la siguiente información:

Coste inicial (€)	Costes de mantenimiento (€/año)	Costes de producción (€/kWh)	Coste de fuel (€/año)
1.058.516	25.680	0,065	0

Tabla 17. Aspectos económicos de la configuración 1. Fuente: Propia.

De esta tabla se puede concluir que, pese a tener un coste inicial elevado debido a que una turbina hidráulica es una tecnología costosa, los costes de producción asociados a esta son bastante bajos, ya que la energía producida mediante el recurso hidráulico es una de las más baratas.

Por otro lado, con los aspectos técnicos de la instalación, se obtiene para la configuración número 1 un exceso de electricidad del 45% con un valor de 1.852.843kWh. Esto se debe a que la turbina hidráulica está trabajando las 24 horas del día. También cabe indicar que esto es así ya que, aunque durante ciertas horas de la noche la demanda sea mínima, las baterías no podrían abastecer electricidad durante tantas horas, ya que, en caso de poder realizarse esto, la profundidad de descarga sería tan elevada que la vida de las baterías caería en picado, produciendo un resultado peor al dado. Esta configuración también da una autonomía de 5,53 horas, confirmando lo comentado anteriormente.

Por último, en lo referente a los aspectos medioambientales, se observan de forma clara las emisiones nulas de esta configuración, ya que se está hablando de que

solo se tiene una turbina hidráulica como fuente de la electricidad generada para cubrir la demanda de la zona de estudio. Del mismo modo, se puede concluir que la fracción de renovables es del 100%.

3.4.1.2 Configuración 2: PV, hidráulica, biomasa y diésel

La segunda configuración propuesta consta de una turbina hidráulica, una instalación fotovoltaica, un generador diésel para casos en los que se requiera más electricidad de la producida por los componentes de energías renovables y un generador de biomasa. También se incluye en esta configuración un inversor para generar corriente alterna de la corriente continua producida por los paneles fotovoltaicos.

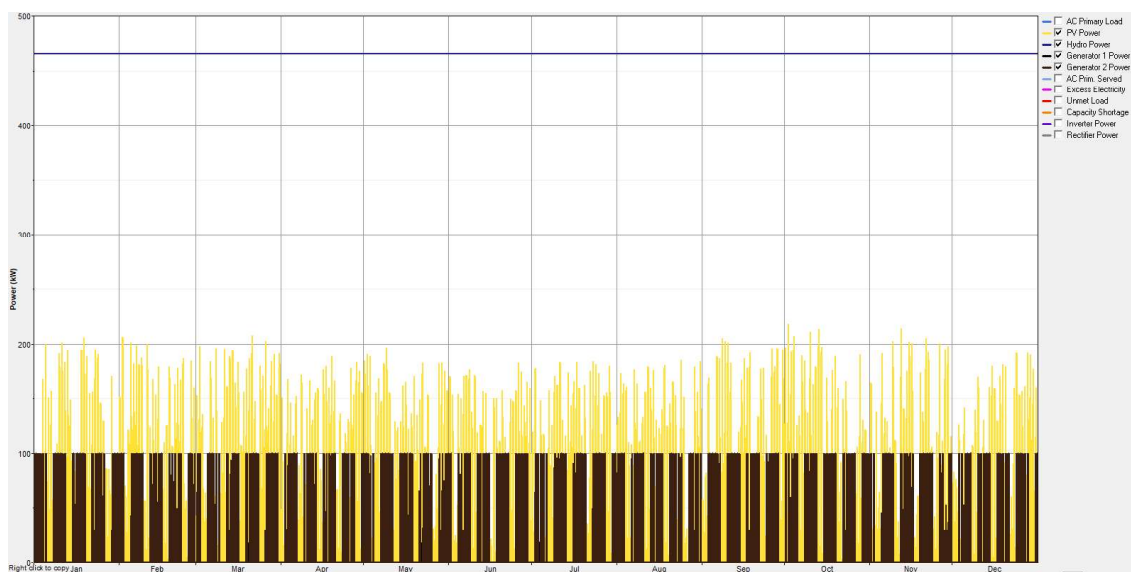


Figura 22. Producción mensual de electricidad. Fuente: HOMER.

De este modo, la configuración quedaría del siguiente modo:

- Turbina hidráulica de 422Kw
- Instalación solar fotovoltaica de 200Kw
- Generador diésel de 60kW
- Generador de biomasa de 100kW
- Inversor de 200kW

Component	Initial	Annualized	Annualized	Annual	Annual	Total
	Capital	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Annualized
	(\$)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
PV Array	222,650	17,417	2,340	30,680	0	50,437
Hydro	683,640	53,479	0	21,100	0	74,579
Generator 1	20,019	1,566	1,208	9,126	34,689	46,589
Generator 2	600,000	46,936	18,104	1,521	9,959	76,520
Converter	14,876	1,164	395	80	0	1,639
Totals	1,541,185	120,562	22,047	62,507	44,648	249,765

Figura 23. Resumen costes configuración 2. Fuente: HOMER.

Ahora se va a pasar a analizar los aspectos económicos de la configuración número 2, con el fin de poder obtener los datos necesarios para una posterior comparación entre alternativas.

Coste inicial (€)	Costes de mantenimiento (€/año)	Costes de producción (€/kWh)	Coste de fuel (€/año)
1.541.185	62.507	0,121	44.648

Tabla 18. Aspectos económicos de la configuración 2. Fuente: Propia.

Con la tabla anterior se puede sacar en claro que la necesidad de incorporar un generador diésel para cubrir un mayor rango de demanda, provoca una mayor inversión anual, debido a los costes de diésel derivados del uso de este generador. También aumentan los costes iniciales y los costes de operación y manos de obra. Esto es obvio ya que se tiene una cantidad mayor de componentes dentro de la instalación.

A continuación, en lo referente a los aspectos técnicos, el software da como dato que existe un 55% de exceso de electricidad, con 2.549.664kWh. Este efecto ya se ha comentado en la configuración anterior, la diferencia radica en que ahora no hay baterías y se tiene una autonomía de 0 horas, por tanto, también sigue siendo preferible la hidráulica para las demandas nocturnas.

Por último, dentro de los aspectos medioambientales existen varias diferencias con respecto a la primera configuración. En este caso se tiene un generador diésel produciendo electricidad durante 1.521 horas/año, lo que conlleva una variación en la fracción de renovables, reduciéndose esta hasta un valor del 98%. Otro aspecto a tener en cuenta son las emisiones. Se ha hablado de que esta configuración utiliza diésel para

la producción de energía, luego este consumo genera unas emisiones, cuyos valores en kg/año se reflejan en la siguiente figura:

Pollutant	Emissions
Carbon dioxide:	67,277 kg/yr
Carbon monoxide:	166.2 kg/yr
Unburned hydrocarbons:	18.41 kg/yr
Particulate matter:	12.53 kg/yr
Sulfur dioxide:	134.9 kg/yr
Nitrogen oxides:	1,483 kg/yr

Figura 24. Emisiones de la configuración 2. Fuente: HOMER.

3.4.1.3 Configuración 3: Hidráulica, biomasa y baterías.

La tercera configuración está constituida por una turbina hidráulica, un generador de biomasa y un conjunto de baterías para poder guardar excedente de energía en los momentos de poca demanda, para aprovecharla en momentos en los que haya un pico de esta. También se incluye un inversor en esta instalación para convertir la corriente alterna en continua y poder, así, almacenarla en las baterías.

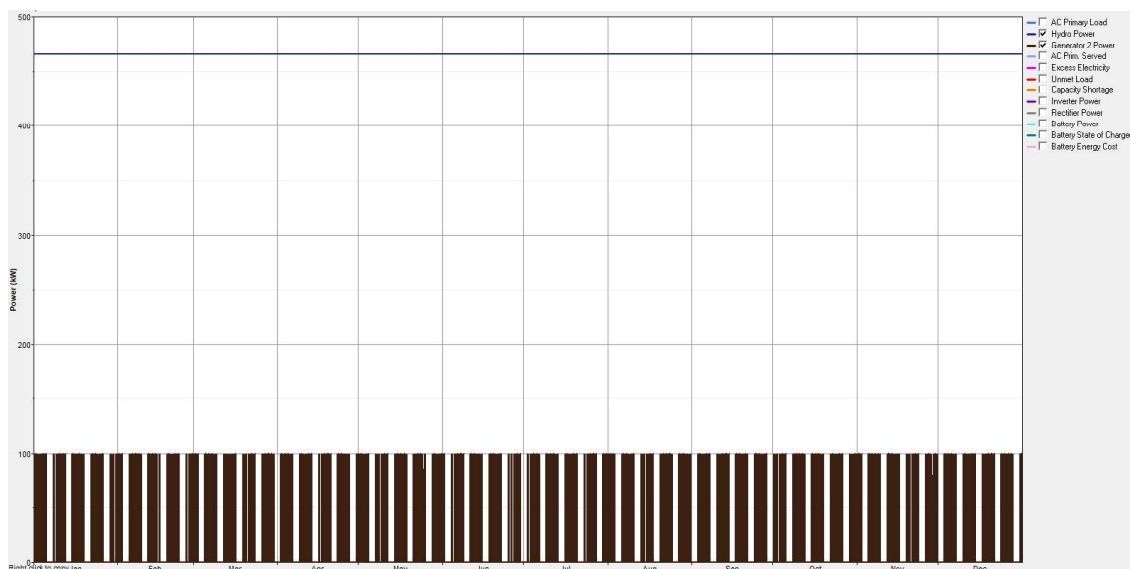


Figura 25. Producción mensual de electricidad. Fuente: HOMER.

De este modo, la configuración quedaría del siguiente modo:

- Turbina hidráulica de 422kW
- Generador de biomasa de 100kW

- 150 baterías Surrette 4KS25P
- Inversor de 100kW

Component	Initial	Annualized	Annualized	Annual	Annual	Total
	Capital	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Annualized
	(\$)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
Hydro	683,640	53,479	0	21,100	0	74,579
Generator 2	600,000	46,936	21,090	1,677	11,390	81,093
Battery	180,000	14,081	10,781	2,250	0	27,111
Converter	7,438	582	198	40	0	819
Totals	1,471,078	115,078	32,068	25,067	11,390	183,602

Figura 26. Resumen costes configuración 3. Fuente: HOMER.

Aspectos económicos de la configuración 3:

Coste inicial (€)	Costes de mantenimiento (€/año)	Costes de producción (€/kWh)	Coste de fuel (€/año)
1.471.078	25.067	0,089	11.390

Tabla 19. Aspectos económicos de la configuración 3. Fuente: Propia:

De la tabla anterior se puede concluir que, pese a los costes iniciales elevados debido a la turbina hidráulica, se obtienen unos costes de producción bastante bajos. Por otro lado, hay que incluir los costes de fuel debidos a la biomasa forestal del generador de biomasa.

Por lo que respecta a los aspectos técnicos de la instalación, en esta configuración se obtiene un excedente eléctrico del 49% con 2.099.257kWh. En referencia a la autonomía, con el conjunto de 150 baterías se puede obtener una autonomía máxima de 2,76 horas.

Por último, dentro de los aspectos medioambientales, cabe destacar que en esta configuración se tiene una fracción de renovables del 100%, ya que no hay ningún generador diésel en esta. Por otro lado, por lo que respecta a las emisiones, pese a que un generador de biomasa sí que tiene emisiones, no se van a tener en cuenta por el ciclo natural de la biomasa. De todos modos, estos serían sus valores:

Pollutant	Emissions
Carbon dioxide:	124.4 kg/yr
Carbon monoxide:	0.494 kg/yr
Unburned hydrocarbons:	0.0547 kg/yr
Particulate matter:	0.0372 kg/yr
Sulfur dioxide:	0 kg/yr
Nitrogen oxides:	4.4 kg/yr

Figura 27. Emisiones de la configuración 3. Fuente: HOMER.

3.4.1.4 Configuración 4: Hidráulica, aerogenerador, biomasa, diésel y baterías.

La cuarta y última configuración consta de una turbina hidráulica, un aerogenerador, un generador de biomasa, un generador diésel, para los casos en los que la demanda de energía sea mayor a la cantidad de energía producida por los componentes renovables, y un conjunto de baterías para almacenar energía cuando haya mayor producción que demanda. También se incluye un inversor para poder almacenar en continua la energía sobrante de la instalación renovable.

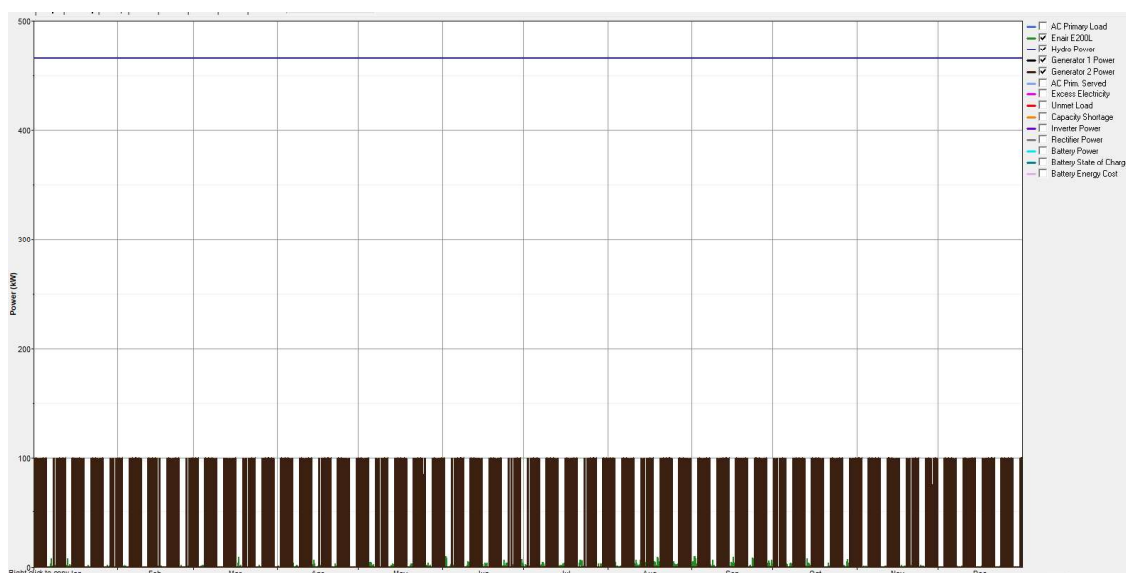


Figura 28. Producción mensual de electricidad. Fuente: HOMER.

De este modo, la configuración quedaría del siguiente modo:

- Turbina hidráulica de 422kW
- Aerogenerador Enair E200L
- Generador diésel de 20kW

- Generador de biomasa de 100kW
- 150 baterías Surrete 4KS25P

Component	Initial	Annualized	Annualized	Annual	Annual	Total
	Capital	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Annualized
	(\$)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
Enair E200L	13,070	1,022	260	500	0	1,783
Hydro	683,640	53,479	0	21,100	0	74,579
Generator 1	6,673	522	374	2,912	10,848	14,656
Generator 2	600,000	46,936	18,360	1,534	10,842	77,671
Battery	180,000	14,081	10,592	2,250	0	26,922
Converter	7,438	582	198	40	0	819
Totals	1.490.821	116.622	29.783	28.336	21.689	196.430

Figura 29. Resumen costes configuración 4. Fuente: HOMER.

En lo referente a los aspectos económicos de la configuración 4:

Coste inicial (€)	Costes de mantenimiento (€/año)	Costes de producción (€/kWh)	Coste de fuel (€/año)
1.490.821	28.336	0,094	21.689

Figura 30. Aspectos económicos de la configuración 4. Fuente: Propia.

De la tabla anterior se puede sacar en claro que, debido a la configuración que se está exponiendo, hay un mayor coste debido al fuel, por el conjunto de diésel y biomasa forestal consumida.

En referencia a los aspectos técnicos de la configuración número 4, se tiene un 49% de excedente eléctrico con un valor de 2.103.497kWh. Debido al gran potencial hidráulico de la zona, en todas las configuraciones se obtiene este valor elevado de excedente, producido por el funcionamiento de la turbina hidráulica. Por otro lado, la autonomía que dan las baterías en esta configuración es de 2,76 horas.

Por último, en lo referente a los aspectos medioambientales, la configuración 4 cuenta con un 99% de fracción renovable. Debido a que se cuenta con un generador diésel en la instalación, se van a tener en cuenta las emisiones contaminantes, cuyo valor es el siguiente:

Pollutant	Emissions
Carbon dioxide:	21,123 kg/yr
Carbon monoxide:	52.3 kg/yr
Unburned hydrocarbons:	5.79 kg/yr
Particulate matter:	3.94 kg/yr
Sulfur dioxide:	42.2 kg/yr
Nitrogen oxides:	467 kg/yr

Figura 31. Emisiones de la configuración 4. Fuente: HOMER.

3.4.2 Selección de criterios

Para saber cuál de las alternativas que ha dado HOMER es la finalmente escogida como solución al trabajo propuesto, se va a hacer uso de una jerarquía de tres niveles. Para obrar del modo más correcto posible, se va a realizar una encuesta a diversos expertos para poder conocer, de este modo, qué criterios tienen más peso, teniendo más influencia a la hora de escoger una alternativa. Los tres criterios sobre los que se va a basar el análisis van a ser: criterio económico, criterio tecnológico y criterio ambiental.

La encuesta se va a realizar a diferentes personas anónimas expertas en cada ámbito, para poder obtener los diferentes puntos de vista necesarios para que la problemática que aborda este trabajo quede resuelta de la forma más satisfactoria y neutral posible. Las personas a las que se va a realizar la encuesta son las siguientes:

- **Criterio económico**
 - Graduado en ADE
 - Director de proyectos
- **Criterio técnico**
 - Ingeniero industrial
 - Ingeniero en energías
- **Criterio medioambiental**
 - Ingeniero agrónomo

Cada uno de los criterios mencionados va a estar dividido en subcriterios, del siguiente modo:

- **Criterio económico**
 - **CE.1. – Inversión inicial:** coste total de la instalación y la tecnología.

- **CE.2. – Coste de mantenimiento:** coste referido a los costes de operación y mantenimiento de la instalación.
- **CE.3. – Coste de producción:** coste de la producción de 1kWh de la instalación.
- **CE.4. – Coste de fuel:** coste del fuel utilizado en el generador diésel.
- **Criterio técnico**
 - **CT.1. – Exceso de electricidad:** energía producida de más en la instalación.
 - **CT.2. – Autonomía:** capacidad de la instalación para cubrir la demanda en caso de no haber producción de energía eléctrica.
 - **CT.3. – Eficiencia:** nivel de optimización de cada instalación.
- **Criterio medioambiental**
 - **CM.1. – Emisiones:** cantidad de residuos emitidos en la generación de energía eléctrica.
 - **CM.2. – Fracción renovable:** porcentaje de la energía consumida cubierta por energías renovables.
 - **CM.3. – Impacto ambiental:** impacto negativo en el entorno causado por la instalación a nivel fauna y flora.

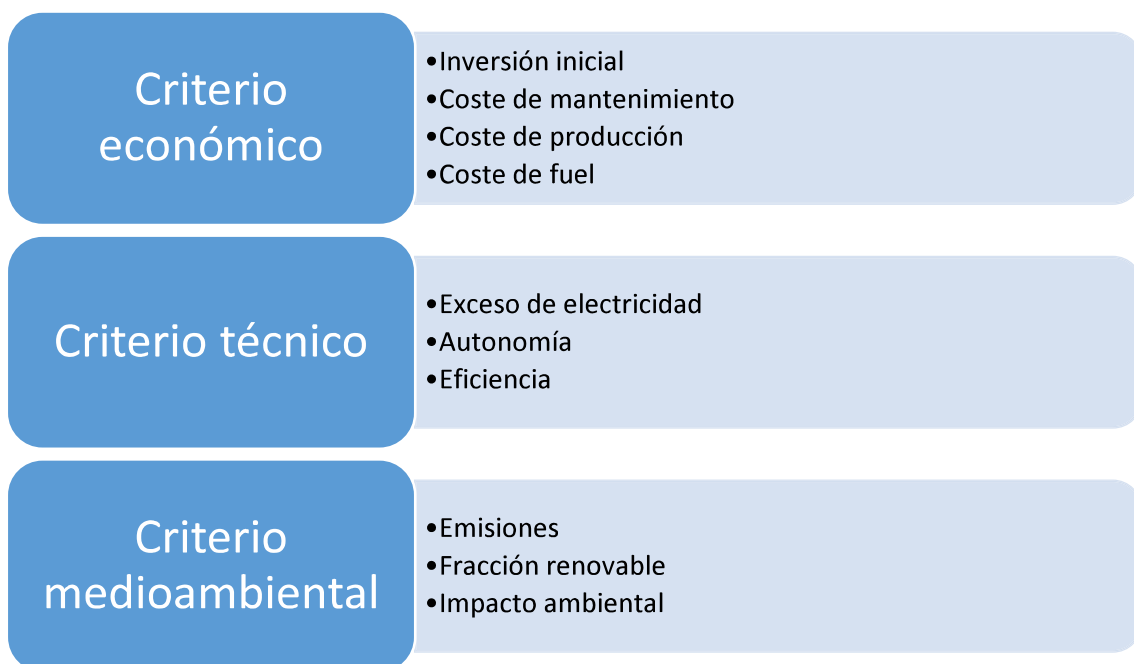


Figura 32. Resumen de criterios. Fuente: Propia.

3.4.3 Ponderación de criterios y alternativas

Una vez definidos los criterios de primer nivel y los criterios de segundo nivel, se va a proceder a la realización de la ponderación de cada uno de ellos. Para llegar a los valores que se van a comentar a continuación se ha realizado una serie de encuestas a expertos, como ya se ha mencionado con anterioridad. En esta encuesta lo que se pretende es que los expertos en cada ámbito de aplicación valoren la importancia de los diferentes criterios de un mismo nivel mediante la ponderación de cada uno de estos, como ya se ha visto en el apartado de “Cálculo de prioridades” del marco teórico.

Para los criterios de primer nivel se han obtenido los siguientes resultados:

	Económico	Técnico	Medioambiental	Media geométrica	Media geométrica normalizada
Económico	1	1/7	1/3	0,362	0,088
Técnico	7	1	3	2,759	0,669
Medioambiental	3	1/3	1	1	0,243

Tabla 20. Ponderación de los criterios de primer nivel. Fuente: Propia.

Con los datos obtenidos en la tabla 17 se concluye:

- **Criterio económico – 8,8%**
- **Criterio técnico – 66,9%**
- **Criterio medioambiental – 24,3%**

Una vez obtenida la ponderación de los criterios de primer nivel, se va a proceder a la obtención de los criterios de segundo nivel. En primer lugar, se van a abordar los criterios económicos, que incluyen: CE.1. – Inversión inicial, CE.2. – Coste de mantenimiento, CE.3. – Coste de producción y CE.4. – Coste de fuel.

	CE.1	CE.2	CE.3	CE.4	Media geométrica	Media geométrica normalizada
CE.1	1	3	5	9	3,41	0,574

CE.2	1/3	1	5	5	1,7	0,286
CE.3	1/5	1/5	1	1	0,447	0,075
CE.4	1/9	1/5	1	1	0,386	0,065

Tabla 21. Ponderación criterios económicos. Fuente: Propia.

Con los datos de la tabla 18 se concluye:

- **Inversión inicial – 57,4%**
- **Coste de mantenimiento – 28,6%**
- **Coste de producción – 7,5%**
- **Coste de fuel – 6,5%**

A continuación, se va a hacer lo mismo con los criterios técnicos, que incluyen:

CT.1. – Exceso de electricidad, CT.2. – Autonomía y CT.3. – Eficiencia.

	CT.1	CT.2	CT.3	Media geométrica	Media geométrica normalizada
CT.1	1	1/5	1/3	0,405	0,091
CT.2	5	1	7	3,271	0,738
CT.3	3	1/7	1	0,754	0,171

Tabla 22. Ponderación criterios técnicos. Fuente: Propia.

Con los datos de la tabla 19 se concluye:

- **Exceso de electricidad – 9,1%**
- **Autonomía – 73,8%**
- **Eficiencia – 17,1%**

Por último, se va a realizar la ponderación de los criterios medioambientales, que incluyen: CM.1. – Emisiones, CM.2. – Fracción renovable y CM.3. – Impacto ambiental.

	CM.1	CM.2	CM.3	Media geométrica	Media geométrica normalizada

CM.1	1	7	5	3,271	0,731
CM.2	1/7	1	1/3	0,362	0,081
CM.3	1/5	3	1	0,843	0,188

Tabla 23. Ponderación criterios medioambientales. Fuente: Propia.

Con los datos de la tabla 19 se concluye:

- **Emisiones – 73,1%**
- **Fracción renovable – 8,1%**
- **Eficiencia – 18,8%**

A continuación, se va a proceder a la ponderación de las alternativas, asignando un peso a cada una en función de los criterios ponderados con anterioridad. Para ello, se va a proceder al cálculo de prioridades criterio a criterio (de segundo nivel).

CE.1. – Inversión inicial: variable cuantitativa (a mayor valor, peor).

	Inversión inicial	Inversa	Pesos normalizados
Alternativa 1	1.058.516	0,00000094471	0,32
Alternativa 2	1.541.185	0,00000064885	0,22
Alternativa 3	1.471.078	0,00000067977	0,23
Alternativa 4	1.490.821	0,00000067077	0,23

Tabla 24. Ponderación inversión inicial. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 32%**
- **Alternativa 2 – 22%**
- **Alternativa 3 – 23%**
- **Alternativa 4 – 23%**

CE.2. – Coste de mantenimiento: variable cuantitativa (a mayor valor, peor)

	Coste de mantenimiento	Inversa	Pesos normalizados

Alternativa 1	25.680	0,0000389	0,3
Alternativa 2	62.507	0,000016	0,12
Alternativa 3	25.067	0,0000399	0,31
Alternativa 4	28.336	0,0000353	0,27

Tabla 25. Ponderación coste de mantenimiento. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 30%**
- **Alternativa 2 – 12%**
- **Alternativa 3 – 31%**
- **Alternativa 4 – 27%**

CE.3. – Coste de producción: variable cuantitativa (a mayor valor, peor)

	Coste de producción	Inversa	Pesos normalizados
Alternativa 1	0,065	15,38	0,34
Alternativa 2	0,121	8,26	0,18
Alternativa 3	0,089	11,236	0,25
Alternativa 4	0,094	10,64	0,23

Tabla 26. Ponderación coste de producción. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 34%**
- **Alternativa 2 – 18%**
- **Alternativa 3 – 25%**
- **Alternativa 4 – 23%**

CE.4. – Coste de fuel: variable cuantitativa (a mayor valor, peor)

	Coste de fuel	Inversa	Pesos normalizados
Alternativa 1	0	-	1
Alternativa 2	44.648	0,0000224	0

Alternativa 3	11.390	0,0000878	0
Alternativa 4	21.689	0,0000461	0

Tabla 27. Ponderación coste de fuel. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 100%**
- **Alternativa 2 – 0%**
- **Alternativa 3 – 0%**
- **Alternativa 4 – 0%**

CT.1. – Exceso de electricidad: variable cuantitativa (a mayor valor, peor)

	Exceso de electricidad	Inversa	Pesos normalizados
Alternativa 1	1.852.843	0,00000054	0,29
Alternativa 2	2.549.664	0,00000039	0,21
Alternativa 3	2.099.257	0,000000476	0,25
Alternativa 4	2.103.497	0,000000475	0,25

Tabla 28. Ponderación exceso de electricidad. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 29%**
- **Alternativa 2 – 21%**
- **Alternativa 3 – 25%**
- **Alternativa 4 – 25%**

CT.2. – Autonomía: variable cuantitativa (a mayor valor, mejor)

	Autonomía	Pesos normalizados
Alternativa 1	5,53	0,5
Alternativa 2	0	0

Alternativa 3	2,76	0,25
Alternativa 4	2,76	0,25

Tabla 29. Ponderación autonomía. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 50%**
- **Alternativa 2 – 0%**
- **Alternativa 3 – 25%**
- **Alternativa 4 – 25%**

CT.3. – Eficiencia: variable cualitativa (a valorar por expertos)

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Media geométrica	Media geométrica normalizada
Alternativa 1	1	7	5	7	3,956	0,64
Alternativa 2	1/7	1	1/3	1	0,467	0,076
Alternativa 3	1/5	3	1	5	1,316	0,214
Alternativa 4	1/7	1	1/5	1	0,411	0,07

Tabla 30. Ponderación eficiencia. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 64%**
- **Alternativa 2 – 7,6%**
- **Alternativa 3 – 21,4%**
- **Alternativa 4 – 7%**

CM.1. – Emisiones: variable cuantitativa (a mayor valor, peor)

	Emisiones totales	Inversa	Pesos normalizados
Alternativa 1	0	-	0,5

Alternativa 2	68.962,6541	0,0000145	0
Alternativa 3	0	-	0,5
Alternativa 4	21.564,8441	0.00004637	0

Tabla 31. Ponderación emisiones. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 50%**
- **Alternativa 2 – 0%**
- **Alternativa 3 – 50%**
- **Alternativa 4 – 0%**

CM.2. – Fracción renovable: variable cuantitativa (a mayor valor, mejor)

	Fracción renovable	Pesos normalizados
Alternativa 1	1	0,252
Alternativa 2	0,98	0,247
Alternativa 3	1	0,252
Alternativa 4	0,99	0,249

Tabla 32. Ponderación fracción renovable. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 25,2%**
- **Alternativa 2 – 24,7%**
- **Alternativa 3 – 25,2%**
- **Alternativa 4 – 24,9%**

CM.3. – Impacto ambiental: variable cualitativa (a valorar por expertos)

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Media geométrica	Media geométrica normalizada
Alternativa 1	1	7	5	9	4,21	0,644

Alternativa 2	1/7	1	1/5	3	0,541	0,083
Alternativa 3	1/5	5	1	5	1,495	0,228
Alternativa 4	1/9	1/3	1/5	1	0,293	0,045

Tabla 33. Ponderación impacto ambiental. Fuente: Propia.

- **Alternativa 1 – 64,4%**
- **Alternativa 2 – 8,3%**
- **Alternativa 3 – 22,8%**
- **Alternativa 4 – 4,5%**

3.4.4 Cálculo de pesos y selección

En este apartado se va a llevar a cabo la ponderación final global para cada alternativa, teniendo en cuenta los pesos de los criterios de primer nivel, de segundo nivel y, por último, los de tercer nivel que corresponden al peso de cada alternativa en referencia a los criterios de segundo nivel. Para ello se va a generar una tabla que recoja todas las ponderaciones generadas con anterioridad y, posteriormente, se va a proceder al cálculo global de la siguiente manera:

$$PESO_{global} = \sum (PESO_{criterio1} \cdot PESO_{criterio2} \cdot PESO_{alternativa})$$

Criterios 1	Criterio económico				Criterio técnico			Criterio medioambiental		
PESOcriterio1	8,8%				66,9%			24,3%		
Criterios 2	CE.1.	CE.2.	CE.3.	CE.4.	CT.1.	CT.2.	CT.3.	CM.1.	CM.2.	CM.3.
PESOcriterio2	57,4%	28,6%	7,5%	6,5%	9,1%	73,8%	17,1%	73,1%	8,1%	18,8%
Alternativa 1	32%	30%	34%	100%	29%	50%	64%	50%	25,2%	64,4%
Alternativa 2	22%	12%	18%	0%	21%	0%	7,6%	0%	24,7%	8,3%
Alternativa 3	23%	31%	25%	0%	25%	25%	21,4%	50%	25,2%	22,8%
Alternativa 4	23%	27%	23%	0%	25%	25%	7%	0%	24,9%	4,5%

Tabla 34. Pesos totales. Fuente: Propia.

Una vez se tiene la tabla, se va a pasar a calcular los pesos globales de cada alternativa:

$$\begin{aligned} \text{Altern}_1 &= 0,32 \cdot 0,574 \cdot 0,088 + 0,3 \cdot 0,286 \cdot 0,088 + 0,34 \cdot 0,075 \cdot 0,088 + 1 \\ &\quad \cdot 0,065 \cdot 0,088 + 0,29 \cdot 0,091 \cdot 0,669 + 0,5 \cdot 0,738 \cdot 0,669 + 0,64 \\ &\quad \cdot 0,171 \cdot 0,669 + 0,5 \cdot 0,731 \cdot 0,243 + 0,252 \cdot 0,081 \cdot 0,243 + 0,644 \\ &\quad \cdot 0,188 \cdot 0,243 = \mathbf{0,49} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Altern}_2 &= 0,22 \cdot 0,574 \cdot 0,088 + 0,12 \cdot 0,286 \cdot 0,088 + 0,18 \cdot 0,075 \cdot 0,088 + 0 \\ &\quad \cdot 0,065 \cdot 0,088 + 0,21 \cdot 0,091 \cdot 0,669 + 0 \cdot 0,738 \cdot 0,669 + 0,076 \\ &\quad \cdot 0,171 \cdot 0,669 + 0 \cdot 0,731 \cdot 0,243 + 0,247 \cdot 0,081 \cdot 0,243 + 0,083 \\ &\quad \cdot 0,188 \cdot 0,243 = \mathbf{0,045} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Altern}_3 &= 0,23 \cdot 0,574 \cdot 0,088 + 0,31 \cdot 0,286 \cdot 0,088 + 0,25 \cdot 0,075 \cdot 0,088 + 0 \\ &\quad \cdot 0,065 \cdot 0,088 + 0,25 \cdot 0,091 \cdot 0,669 + 0,25 \cdot 0,738 \cdot 0,669 + 0,214 \\ &\quad \cdot 0,171 \cdot 0,669 + 0,5 \cdot 0,731 \cdot 0,243 + 0,252 \cdot 0,081 \cdot 0,243 + 0,228 \\ &\quad \cdot 0,188 \cdot 0,243 = \mathbf{0,288} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Altern}_4 &= 0,23 \cdot 0,574 \cdot 0,088 + 0,27 \cdot 0,286 \cdot 0,088 + 0,23 \cdot 0,075 \cdot 0,088 + 0 \\ &\quad \cdot 0,065 \cdot 0,088 + 0,25 \cdot 0,091 \cdot 0,669 + 0,25 \cdot 0,738 \cdot 0,669 + 0,07 \\ &\quad \cdot 0,171 \cdot 0,669 + 0 \cdot 0,731 \cdot 0,243 + 0,249 \cdot 0,081 \cdot 0,243 + 0,045 \\ &\quad \cdot 0,188 \cdot 0,243 = \mathbf{0,174} \end{aligned}$$

- Alternativa 1 – 49,3%
- Alternativa 2 – 4,5%
- Alternativa 3 – 28,8%
- Alternativa 4 – 17,4%

4 CONCLUSIONES

El objetivo del presente TFG era analizar el contexto energético de la República Democrática del Congo y estudiar la introducción de las energías renovables en pequeños poblados con el fin de aumentar el % de electrificación del país en base a una alternativa de generación distribuida basada en renovables. Para ello, en primera instancia se estudia el contexto energético utilizando la herramienta de escenarios energéticos, seguidamente se analiza a pequeña escala la viabilidad de pequeños sistemas de generación renovable basada en sistemas híbridos para cubrir la demanda eléctrica de una zona concreta; y finalmente se aplica el método AHP para identificar la solución más prometedora de entre todas las soluciones técnicamente viables.

Se ha estudiado el escenario energético en el que estaba inmerso el país en los últimos años, generando dos nuevos escenarios futuros. El primero de ellos, el tendencial, para observar cómo sería el país en el caso de mantener las tendencias energéticas de los últimos años y, el segundo, un escenario propuesto para aumentar el grado de electrificación en un 80%.

A continuación, mediante el estudio de los recursos energéticos de la zona y la demanda de energía requerida en Imonga, se introdujeron los datos y la tecnología propuesta para cubrir estas necesidades en el software HOMER, para realizar el estudio técnico y económico de las distintas soluciones. Con ello, se propusieron 4 configuraciones de instalaciones híbridas renovables para abastecer la zona de estudio.

Por último, una vez obtenidas y analizadas las alternativas generadas para cubrir la demanda, mediante el método AHP, en el que han participado mediante encuestas reales expertos en diferentes ámbitos, como son el económico, el técnico y el medioambiental, se ha llegado al consenso de que la mejor solución para la zona de estudio es la Alternativa 1, con un 49,3%. La alternativa 1 consta de los siguientes elementos:

- Turbina hidráulica de 422kW
- 300 baterías Surrette 4KS25P
- Inversor de 200kW

5 BIBLIOGRAFÍA

¿Qué es el gasóleo? [Internet]. ClickGasoil. 2017 [citado 31 de mayo de 2019].
Disponible en: <https://www.clickgasoil.com/blog/que-es-el-gasoleo>

¿Qué son las centrales hidroeléctricas y qué tipos existen? [Internet]. [citado 30 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://www.ceupe.com/blog/las-centrales-hidroelectricas-y-los-tipos-que-existen.html>

Datos técnicos turbina Kaplan > Hidráulica > Productos > Inicio [Internet]. [citado 17 de junio de 2019]. Disponible en: <http://www.ades.tv/energias-renovables/energia-hidraulica/hidraulica/datos-tecnicos-turbina-kaplan/id/238>

Agua GGE. El agua como fuente de energía [Internet]. iAgua. 2015 [citado 30 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/genergea/agua-como-fuente-energia>

Portillo G. Qué es y para qué sirve un inversor de corriente [Internet]. Renovables Verdes. 2018 [citado 31 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://www.renovablesverdes.com/inversor-corriente/>

Radiación solar [Internet]. [citado 16 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://solar-energia.net/definiciones/radiacion-solar.html>

Renewable Energy Cost Analysis - Biomass for Power Generation [Internet]. /publications/2012/Jun/Renewable-Energy-Cost-Analysis---Biomass-for-Power-Generation. [citado 14 de junio de 2019]. Disponible en: </publications/2012/Jun/Renewable-Energy-Cost-Analysis---Biomass-for-Power-Generation>



Selva del Congo - EcuRed [Internet]. [citado 12 de junio de 2019]. Disponible en: [https://www.ecured.cu/Selva del Congo](https://www.ecured.cu/Selva_del_Congo)

Solar Fotovoltaica [Internet]. [citado 14 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>

Turbina hidráulica. En: Wikipedia, la enciclopedia libre [Internet]. 2019 [citado 30 de mayo de 2019]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Turbina hidr%C3%A1ulica&oldid=115024460](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Turbina_hidr%C3%A1ulica&oldid=115024460)

Uso eléctrico | IDAE [Internet]. [citado 14 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico>

Venta Generadores | 10 años generando energía 💡 [Internet]. [citado 14 de junio de 2019]. Disponible en: <https://landbot.io/u/H-88285-W49ESEUHX1BAWSP7/index.html>

Visualizador-2018 | IVE [Internet]. [citado 12 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.five.es/productos/herramientas-on-line/visualizador-2018/>

Agencia Internacional de la Energía. <https://www.iea.org>

Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/>

Web IRENA. <https://www.irena.org/>

Plan de Energías Renovables (PER). <https://www.idae.es>



Asignatura de Introducción a las Energías Renovables.

Asignatura de Tecnología Energética.

“Atlas des energies renouvelables de la RDC”.

ANEXOS

ANEXO I: ENCUESTA A EXPERTOS

Criterios de primer nivel

¿Cuál es más importante y cuánto más?

Criterio económico	
Criterio técnico	x

1	3	5	7	9
			x	

Criterio económico	
Criterio medioambiental	x

1	3	5	7	9
	x			

Criterio técnico	x
Criterio medioambiental	

1	3	5	7	9
	x			

Criterios de segundo nivel (económico)

¿Cuál es más importante y cuánto más?

Inversión inicial	x
Coste de mantenimiento	

1	3	5	7	9
	x			

Inversión inicial	x
Coste de producción	

1	3	5	7	9
		x		

Inversión inicial	x
Coste de fuel	

1	3	5	7	9
				x



Coste de mantenimiento	x
Coste de producción	

1	3	5	7	9
		x		

Coste de mantenimiento	x
Coste de fuel	

1	3	5	7	9
		x		

Coste de producción	x
Coste de fuel	

1	3	5	7	9
x				

Criterios de segundo nivel (técnico)

¿Cuál es más importante y cuánto más?

Exceso de electricidad	
Autonomía	x

1	3	5	7	9
		x		

Exceso de electricidad	
Eficiencia	x

1	3	5	7	9
	x			

Autonomía	x
Eficiencia	

1	3	5	7	9
			x	

Criterios de segundo nivel (medioambiental)

¿Cuál es más importante y cuánto más?

Emisiones	x
Fracción renovables	

1	3	5	7	9
			x	

Emisiones	x
Impacto ambiental	

1	3	5	7	9
		x		

Fracción renovables	
Impacto ambiental	x

1	3	5	7	9
	x			

Criterios de tercer nivel

¿Cuál es más importante y cuánto más en lo referente a eficiencia?

Alternativa 1	x
Alternativa 2	

1	3	5	7	9
			x	

Alternativa 1	x
Alternativa 3	

1	3	5	7	9
		x		

Alternativa 1	x
Alternativa 4	

1	3	5	7	9
			x	



Alternativa 2	
Alternativa 3	x

1	3	5	7	9
	x			

Alternativa 2	x
Alternativa 4	

1	3	5	7	9
1				

Alternativa 3	x
Alternativa 4	

1	3	5	7	9
		x		

¿Cuál es más importante y cuánto más en lo referente a menor impacto ambiental?

Alternativa 1	x
Alternativa 2	

1	3	5	7	9
			x	

Alternativa 1	x
Alternativa 3	

1	3	5	7	9
		x		

Alternativa 1	x
Alternativa 4	

1	3	5	7	9
				x

Alternativa 2	
Alternativa 3	x

1	3	5	7	9
		x		



Alternativa 2	x
Alternativa 4	

1	3	5	7	9
	x			

Alternativa 3	x
Alternativa 4	

1	3	5	7	9
		x		



PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO				
ESTUDIO DE UN SISTEMA HÍBRIDO RENOVABLE EN ZONA AISLADA				
Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio unitario	Importe
1	Estudio del contexto energético del país			
1.1	Búsqueda y recogida de información sobre el contexto del país			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	10	40,00 €	400,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	400,00 €	4,00 €
Total				404,00 €
1.2	Realización de escenario energético tendencial			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	7	40,00 €	280,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	280,00 €	2,80 €
Total				282,80 €
1.3	Realización de escenario energético propuesto			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	9	40,00 €	360,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	360,00 €	3,60 €
Total				363,60 €
1.4	Reuniones de trabajo			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	3	40,00 €	120,00 €
	Ingeniera Industrial	3	60,00 €	180,00 €
	Costes directos complementarios	0,03	300,00 €	9,00 €
Total				309,00 €
1.5	Redacción de textos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	10	40,00 €	400,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	400,00 €	4,00 €
Total				404,00 €
Total unidad de obra				1.763,40 €

2	Estudio de la demanda de la zona de estudio			
2.1	Consulta de datos en atlas			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	15	40,00 €	600,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	600,00 €	6,00 €
Total				606,00 €
2.2	Reuniones de trabajo			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	3	40,00 €	120,00 €
	Ingeniera Industrial	3	60,00 €	180,00 €

	Costes directos complementarios	0,03	300,00 €	9,00 €
Total				309,00 €
2.3	Cálculo de la demanda			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	5	40,00 €	200,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	200,00 €	2,00 €
Total				202,00 €
2.3	Redacción de textos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	10	40,00 €	400,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	400,00 €	4,00 €
Total				404,00 €
Total unidad de obra				1.521,00 €

3	Estudio de los recursos energéticos de la zona de estudio			
3.1	Consulta de datos en atlas			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	15	40,00 €	600,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	600,00 €	6,00 €
Total				606,00 €
3.2	Reuniones de trabajo			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	3	40,00 €	120,00 €
	Ingeniera Industrial	3	60,00 €	180,00 €
	Costes directos complementarios	0,03	300,00 €	9,00 €
Total				309,00 €
3.3	Redacción de textos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	10	40,00 €	400,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	400,00 €	4,00 €
Total				404,00 €
Total unidad de obra				1.319,00 €

4	Selección de equipos			
4.1	Consulta de fichas técnicas y precios de diferentes equipos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	25	40,00 €	1.000,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	1.000,00 €	10,00 €
Total				1.010,00 €
4.2	Selección de los equipos adecuados en función de recursos y demanda			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	20	40,00 €	800,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	800,00 €	8,00 €
Total				808,00 €
4.3	Reuniones de trabajo			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	3	40,00 €	120,00 €

	Ingeniera Industrial	3	60,00 €	180,00 €
	Costes directos complementarios	0,03	300,00 €	9,00 €
Total				309,00 €
4.4	Redacción de textos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	15	40,00 €	600,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	600,00 €	6,00 €
Total				606,00 €
Total unidad de obra				2.733,00 €

5	Estudio técnico y económico			
5.1	Licencia del Software HOMER			
	Licencia de HOMER	1	1.000,00 €	1.000,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	1.000,00 €	10,00 €
Total				1.010,00 €
5.2	Introducción de datos y selección de resultados			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	20	40,00 €	800,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	800,00 €	8,00 €
Total				808,00 €
5.3	Reuniones de trabajo			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	3	40,00 €	120,00 €
	Ingeniera Industrial	3	60,00 €	180,00 €
	Costes directos complementarios	0,03	300,00 €	9,00 €
Total				309,00 €
5.4	Redacción de textos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	15	40,00 €	600,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	600,00 €	6,00 €
Total				606,00 €
Total unidad de obra				2.733,00 €

6	Análisis AHP			
6.1	Elaboración de encuestas			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	2	40,00 €	80,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	80,00 €	0,80 €
Total				80,80 €
6.2	Reuniones con expertos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	7	40,00 €	280,00 €
	Graduado en ADE	7	30,00 €	210,00 €
	Director de proyectos	7	50,00 €	350,00 €
	Ingeniero Industrial	7	60,00 €	420,00 €
	Ingeniero en Energías	7	40,00 €	280,00 €



	Ingeniero Agrónomo	7	40,00 €	280,00 €
	Costes directos complementarios	0,03	1.820,00 €	54,60 €
Total				1.874,60 €
6.3	Redacción de textos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	15	40,00 €	600,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	600,00 €	6,00 €
Total				606,00 €
Total unidad de obra				2.561,40 €

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	12.630,80 €
Gastos Generales (15%)	1.894,62 €
Beneficio Industrial (6%)	757,85 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	15.283,27 €
I.V.A. (21%)	3.209,49 €
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	18.492,75 €