

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA SOSTENIBLE

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN EN UN HUERTO DE MORINGA OLEIFERA

Estudiante	<i>Larumbe Aguirre, Eneko</i>
Director/Directora	<i>Arriaga Bayo, Pedro</i>
Departamento	<i>Ingeniería energética</i>
Curso académico	<i>Primer curso</i>

Bilbao, Lunes, 1 de Marzo de 2021

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento:

En primer lugar a mi tutor, el Dr. Pedro Arriaga, por haberme acompañado a lo largo de esta aventura. Su entera disposición, cualquiera que fuera la circunstancia, me ha demostrado que tomé la mejor de las decisiones al contar con él. Su amplia experiencia ha servido de soporte en muchas situaciones y estoy seguro de que ello lo llevará a poder vivir otras muchas aventuras por el mundo.

También a Silvia Llopart (M'Bolo Association) y Xavi Galindo (Cultivant Vida) por haberme ofrecido la oportunidad de colaborar con ellos y aportar mi granito de arena al gran trabajo que están realizando en Gambia. Estoy seguro de que nuestros caminos se volverán a reencontrar.

Al Dr. Francisco Gomes Pereira, cuyo trabajo ha servido de inspiración para la realización de este proyecto. Muchas gracias por toda la ayuda ofrecida y mucha suerte en todos sus futuros proyectos.

A mi familia y amigos, que han sido los que han estado siempre ahí. Todas esas personas dispuestas a entender y apoyar mis decisiones. Es imposible describir en pocas palabras todo lo que significan para mí, pero lo que tengo claro es que esto no sería posible sin ellos.

Trabajo dedicado a mi padre, **Iñaki Larumbe**, la persona que me enseñó que la felicidad de una persona empieza desde su libertad. Tomo tu palabra y demostraré al mundo todo lo que me enseñaste. Estés donde estés, espero que me observes con una sonrisa.



Índice

1	Objetivos	1
2	Contexto.....	3
2.1	Introducción	3
2.2	Actividades principales en Gambia.....	4
2.3	Pobreza energética	5
2.4	Electrificación nacional.....	6
2.5	Distribución eléctrica: Oferta y demanda	8
2.6	Energía solar y M'Bolo Association	10
2.7	Cultivant Vida.....	12
2.8	Árbol de la vida: <i>Moringa oleifera</i>	13
2.9	Moringa en forma de combustible	16
2.10	Correlación para la estimación del poder calorífico	17
2.11	Tecnología de generación auxiliar.....	19
2.12	Características de la tecnología ORC	22
3	Beneficios	25
4	Descripción de requerimientos	28
4.1	Análisis del emplazamiento: Muritabeh	28
4.2	Procesos conectados a la generación energética.	29
5	Fundamentos del proyecto	32
5.1	Orientación de los paneles solares.....	32
5.2	Desafío de la generación ininterrumpida	33
5.3	Vectores energéticos en la planta de la moringa	34
6	Desarrollo de los cálculos.....	36
6.1	Condiciones del entorno y su consecuente crecimiento vegetal.....	36
6.2	Cálculo de consumo en el huerto escuela	39
6.2.1	Bombeo de agua.....	39
6.2.2	Pre-secado.....	40
6.2.3	Trituradora	41
6.2.4	Secado definitivo y almacenamiento	41

6.2.5	Extracción de aceite	41
6.2.6	Procesado de combustible secundario y consumo local.....	42
6.3	Condiciones del sistema solar fotovoltaico	44
6.4	Análisis del abastecimiento solar e intervención del almacenamiento en baterías .	46
6.5	Capacidad energética de biomasa local como combustible.....	50
6.6	Adaptación de la tecnología auxiliar	54
6.6.1	Generación con biomasa a baja temperatura	54
6.6.2	Almacenamiento en baterías de litio.....	56
6.7	Dimensionamiento del sistema definitivo.....	57
7	Alternativas	66
8	Conclusiones.....	68
9	Diagrama de Gantt	71
10	Bibliografía	72
Anexos.....		79
Anexo I. Plantas de generación eléctrica en funcionamiento on-grid actualmente.....		79
Anexo II. Proyección (2016) de la capacidad eléctrica en Gambia, en un escenario independiente de proyecto hidroeléctrico y un escenario dependiente del proyecto hidroeléctrico.....		80
Anexo III. Escenarios energéticos probables para el futuro de Gambia.....		81
Anexo IV. Composición y propiedades del aceite extraído por prensado frío.		82
Anexo V. Composición restos de biomasa de la moringa.....		83
Anexo VI. Propiedades destacadas de los fluidos de trabajo.....		84

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1.- Árbol de <i>Moringa oleifera</i> .	2
Ilustración 2.1.- Situación del grid nacional en el año 2012.	7
Ilustración 2.2.- Situación del grid nacional en el año 2017.	7
Ilustración 2.3.- Recurso renovable en Gambia. A) Solar de concentración, b) solar fotovoltaico, c) eólica.	10
Ilustración 2.4.- Mujeres de M'Bolo Association en una instalación solar PV.	12
Ilustración 2.5.- <i>Moringa oleifera</i> . A la izquierda hojas y flores, a la derecha vaina compuesta por semillas.	15
Ilustración 2.6.- Pellets de hojas de moringa.	16
Ilustración 2.7.- Diagrama de un sistema ORC con regeneración.	20
Ilustración 2.8.- Modelo de diagrama T-s con refrigeración en ORC.	23
Ilustración 4.1.- Localización del huerto escuela, en Muritabeh.	28
Ilustración 4.2.- Abastecimiento eléctrico en las líneas de trabajo.	31
Ilustración 6.1.- Abastecimiento solar fotovoltaico respecto al consumo anual, sin producción de pellets.(PV-GIS)	48
Ilustración 6.2.- Abastecimiento solar fotovoltaico respecto al consumo anual, con producción de pellets.(PV-GIS)	48
Ilustración 6.3.- Procesado de <i>Moringa oleifera</i> y fracción vegetal aprovechada.	53
Ilustración 6.4.- Diagrama de proceso ORC de baja temperatura.	55
Ilustración 6.5.- Diagrama T-s del fluido de trabajo R245fa.	56
Ilustración 6.6.- Capacidad de generación desde biomasa y energía solar.	58
Ilustración 6.7.- Esquema de generación solar (4.5kW) con generación auxiliar en baterías de litio (2kWh).	61
Ilustración 6.8.- Capacidad de abastecimiento del sistema solar PV (4.5kW) con baterías (2kWh).	61
Ilustración 6.9.- Sistema híbrido de generación solar y ORC auxiliar.	62
Ilustración 6.10.- Capacidad de abastecimiento del sistema híbrido con ORC y baterías (2kWh).	63

Índice de tablas

Tabla 2.1.- Crecimiento de la demanda eléctrica a lo largo de los últimos años.	9
Tabla 2.2.- Propiedades de las hojas de <i>Moringa oleifera</i>	14
Tabla 2.3.- Procesos termoquímicos de generación eléctrica desde biomasa.	19
Tabla 2.4.- Clasificación de fluidos de trabajo.	22
Tabla 2.5.- Equipos y características habituales en sistemas ORC.	24
Tabla 6.1.- Datos meteorológicos en Kolda, cerca de Muritabeh.	37
Tabla 6.2.- Equipos de tratamiento de moringa y sus respectivas características.	43
Tabla 6.3.- Irradiación global diaria media para las distintas alternativas. (PV-GIS)	44
Tabla 6.4.- Datos de irradiación diaria media sobre el plano horizontal. (PV-GIS).....	46
Tabla 6.5.- Calendario de entrada en funcionamiento (verde) de cada equipo.	47
Tabla 6.6.- Recursos transformables en biocombustibles.....	51
Tabla 6.7.- Propiedades energéticas de los biocombustibles para la generación auxiliar.	51
Tabla 6.8.- Escenarios analizados con sus respectivos valores de consumo y abastecimiento.	59
Tabla 6.9.- Análisis económico de los escenarios de generación.	65

Acrónimos

AVRDC	Centro mundial de Vegetales
β	Ángulo de elevación del plano
B_{dm}	Irradiación directa diaria media
D_{dm}	Irradiación difusa diaria media
EDD	Escenario eléctrico dependiente
EID	Escenario eléctrico independiente
$G(0)$	Irradiancia global sobre superficie horizontal
GBA	Great Banjul area
G_{dm}	Irradiación global diaria media
GWh	GigaWattio·Hora
h	Hora
ha	Hectárea
IEA	International energy agency
IPP	Independent Power Plant
IRENA	Agencia Internacional de las Energías Renovables
kg	Kilogramo
km	Kilómetro
kV	Kilovoltio
kWh/m^2	Kilowattio hora por metro cuadrado
LGBT	Lesbianas, Gais, Bisexuales y Transgénero
m^3/s	Metro cúbico por segundo
MJ	Megajulio
MJ/kg	Megajulio por kilogramo
MW	Megavatio
MW_e	Megawattio eléctrico
NAWEC	National Water and Electricity
$^{\circ}$	Grado
$^{\circ}C$	Grados centígrados
O&M	Costes de operación y mantenimiento
OMVG	Organización del Desarrollo de la Cuenca del Río Gambia
ORC	Ciclo orgánico Rankine
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PIB	Producto interior bruto
PURA	Public Utilities Regulation Authority
PV	Fotovoltaica
SSA	África Subsahariana
V	Voltio
W	Vatio

Resumen

En la actualidad, más de 1300 millones de personas no cuentan con acceso a la electricidad en el mundo y otras 1000 millones cuentan con un acceso poco fiable. Este proyecto se traslada a Gambia, país en el que el ralentizado progreso en la ampliación del grid y la pobreza energética imposibilitan el abastecimiento de las zonas rurales, viéndose obligados a la utilización desmesurada e insegura de combustibles fósiles. Bajo este contexto, la generación energética descentralizada parece significar una oportunidad de transición hacia la electrificación del país, partiendo desde las principales actividades nacionales. Un huerto de 0.25ha en Muritabeh, un pequeño pueblo de Gambia, resulta en una interesante localización para implantar un sistema autoabastecido de generación, estimando un consumo local aproximado de 1263kWh al año para el tratamiento de *Moringa oleifera*. La energía solar fotovoltaica se selecciona como fuente de generación principal, con una potencia mínima a instalar de 4.5kW. Las alternativas para su generación auxiliar son, por un lado, la utilización de baterías de litio, que logra abastecer un 80% del consumo con la incorporación de 2kWh sobre una potencia fotovoltaica de 4.5kW, y, por el otro lado, un sistema ORC de aprovechamiento de biomasa que, dada su limitada producción, apenas consigue un 87% de abastecimiento con su soporte al sistema fotovoltaico. Las condiciones locales son entonces valoradas para concluir que para un completo abastecimiento es necesario reemplazar la etapa de deshidratación artificial y reducir el consumo local, o bien incorporar la tecnología ORC sobre el sistema solar de 4.5kW de capacidad fotovoltaica y 2kWh en baterías. De esta manera, el sistema consigue alcanzar un abastecimiento del 121% respecto al consumo, con una hibridación que permite además una mayor flexibilidad y proporcionalidad respecto a la producción local.

Laburpena

Gaur egun 1300 milloi pertsona baino gehiagok ez dauka elektrizitate hornikuntzarik eta beste 1000 milloi pertsonak segurtasun murriztekoa daukate. Proiektu hau Gambian ezartzen da, non grid-aren hedapen motelak eta energia pobrezia arazo bat adierazten duten isolaturiko zonaldeentzat, seguruak ez diren erregaiak erabiltzera derrigortuz. Horren ondorioz, deszentralizaturiko energia distribuzioa Gambiaren elektrifikaziorako trantsiziozko pausuan bihurtu daiteke, herrialdean ohikoenak diren jardueretatik hasita. Gambian kokaturiko 0.25ha-ko ortu bat, Muritabeh izeneko herri txiki batean, autohornikuntzarako sistema bat diseinatzeko leku apropos moduan erabaki da, urtero 1263kWh-ko kontsumoa egonik bertako *Moringa oleifera* landarea tratatzeko. Energia sorrerarako oinarri moduan, eguzki-energia fotovoltaikoa erabiltzea erabaki da, gutxieneko 4.5kW-ko potentziadun sistema aukeratuz. Honen atzetik, euskarri moduan lan egin dezan, bi aukera aztertu dira. Alde batetik litio baterien erabilera, 2kWh-ko edukiera duen bateria 4.5kW-ko potentziadun sistema fotovoltaikoan ezarriz kontsumoaren %80-ko hornidura lortuz. Beste aldetik, bertan sortutako biomasa aprobetxatzeko tenperatura baxuko ORC sistema ezarriz, eguzki-energiarekin bat egin eta %87-ko hornidura lortuz. Bertako baldintzak hartzen dira orduan kontutan eta erabateko hornidura lortzeko artifizialki ezarritako lehorketa etapa ordezkatu egin behar dela edo ORC sistema eta fotovoltaiko-bateria sistema bat egin behar direla ondorioztatu da. Modu honetan, kontsumoarekiko %121-ko ahalmena duen sistema lortu da, flexibilitate eta proportzionaltasun handiagoa errazten dituen sistemaren hibridazioaren bidez.

Summary

Currently, more than 1.3 billion people in the world do not have access to electricity and 1 billion more have unreliable access. This project moves to the Gambia, a country where slow progress in expanding the grid and energy poverty make it impossible to supply rural areas, being forced to use fossil fuels unruly and riskily. In this context, decentralized energy generation seems to represent a transition option towards the electrification of the country, starting from the main national activities. A 0.25ha *Moringa oleifera* cultivation in Muritabeh, a small town in the Gambia, is an interesting location to implement a self-sufficient generation system, estimating an approximate local consumption of 1263kWh per year. Photovoltaic solar energy is then selected as the main generation source, with a minimum installed power of 4.5kW. The alternatives for its auxiliary generation are, on the one hand, the use of lithium batteries, which manages to supply 80% of the consumption with the incorporation of 2kWh on a photovoltaic power of 4.5kW, and, on the other hand, an ORC system using locally produced biomass which, due to its limited production, barely achieves an 87% supply with its support to the photovoltaic system. The local conditions are then evaluated to conclude that for a complete supply it is necessary either to replace the artificial dehydration step and reduce local consumption, or to incorporate ORC technology on the solar system of 4.5kW of photovoltaic capacity and 2kWh in batteries. In this way, the system achieves a supply of 121% with respect to consumption, stimulating a hybridization that also allows greater flexibility and proportionality with respect to local production.

1 OBJETIVOS

La incomunicación eléctrica es un gran problema que afecta a todos los sectores de Gambia, de entre los que se destaca la agricultura. Actividad popular históricamente y muy protagonizada por el sexo femenino, donde gran parte del trabajo se realiza aún de manera manual y supone así un gran consumo del tiempo del que las mujeres apenas disponen.

Llegados a este punto, varias son las organizaciones que se han aventurado a trabajar para impulsar un futuro más igualitario para la sociedad e involucrarse así en el acondicionamiento de un huerto escuela en el pueblo de Muritabeh, en la zona rural de la región Central River. Este proyecto, con la colaboración de M'Bolo Association y Cultivant Vida, propone por tanto una solución híbrida de electrificación de un huerto escuela con cultivos de moringa, que sea sostenible y autosuficiente, para poder así facilitar y acelerar el tratamiento vegetal del lugar. Logrando de este modo el abastecimiento eléctrico de un lugar para la producción de moringa, árbol con increíbles propiedades, promover la igualdad de género en este tipo de labores y educar jóvenes que traten de introducirse en el sector agrícola.

En este entorno, el presente proyecto tiene como objetivo el análisis de viabilidad de una generación totalmente independiente y autosuficiente del huerto escuela. El aprovechamiento de la capacidad solar con la que cuenta el territorio para apostar por un diseño híbrido que combine la generación fotovoltaica con una generación auxiliar de origen vegetal.

Llega el momento de analizar si existe la posibilidad de llevar una innovadora alternativa a la práctica, la realización de un sistema de generación energética alimentado únicamente por recursos no aprovechados de la moringa para suplir así al sistema de generación principal. Logrando de esta manera, enfrentar las posibles intermitencias del recurso solar y lograr maximizar el rendimiento de los productos de la moringa.

En primer lugar, resulta fundamental un estudio de los procesos llevados a cabo en el huerto de 0.25ha para el tratamiento de la moringa. Esto sirve como base para estimar el consumo que debe abastecer el diseño energético a desarrollar en el proyecto. Además, los resultados permiten analizar el ritmo de producción de moringa, desde la cual una fracción es destinada a la producción de combustible de generación auxiliar.

De toda la materia vegetal producida, la selección de combustible de generación auxiliar se convierte en un desafío a afrontar, un desafío que busca maximizar la eficiencia de producción de un misterioso árbol que cuenta con infinidad de aplicaciones. Este proyecto quiere así demostrar, en un caso real, las capacidades de producción energética que tienen las diferentes variantes de esta misma planta.

En vista de los resultados obtenidos hasta este punto, se va proceder en último lugar a diseñar un esquema sobre el funcionamiento en una situación real. Para ello, se van a tomar en cuenta las condiciones locales y se va a determinar así un sistema óptimo y eficaz de generación energética.



Ilustración 1.1.- Árbol de Moringa oleifera.

2 CONTEXTO

2.1 Introducción

La producción energética muestra a día de hoy la prosperidad de las civilizaciones alrededor del globo terráqueo, puesto que así consigue abastecer la incesable demanda energética provocada por las necesidades humanas. En este aspecto, se han establecido diferentes escenarios en función de diferentes variables que muestran un característico progreso energético en un específico lugar, variables que van desde las características históricas territoriales como lo son la economía, tecnología o política de un país hasta las reservas de combustibles fósiles locales, que siguen significando la fuente principal en el MIX energético mundial. Esto ha provocado que los territorios con mayor poder consigan un mayor nivel de abastecimiento y que países con recursos energéticos fósiles hayan podido acelerar su desarrollo y poder adquisitivo.

África Subsahariana o África negra engloba a un total de 49 países ubicados en el sur del desierto de Sahara. Se trata de una zona tan empobrecida que cuenta con cerca de 77 millones de personas que viven por debajo de la línea de pobreza internacional, situada en 1\$/día. Además, hay que mencionar que África Subsahariana, con una población de 800 millones de personas, cuenta con menor capacidad eléctrica instalada que un país como España, con tan solo 46 millones de habitantes. África Subsahariana y el sur de Asia cuentan así con la mayor población sin acceso a electricidad del mundo, con más del 80% respecto a toda la población sin acceso eléctrico, y destacando las zonas rurales en África Subsahariana con únicamente el 14% de la población con acceso a la electricidad [1]. Esto convierte a los países que completan el territorio en zonas muy vulnerables y subdesarrolladas, donde además reside aún una gran discriminación hacia las mujeres africanas. Al oeste de la África subsahariana, con costa bañada por el océano Atlántico, se encuentra la subregión de África Occidental, hogar de un 5% de la población mundial distribuida en un total de 19 países, y que cubre sus necesidades con cerca del 40% de la energía consumida en un país como España según el libro rojo de la Energía. Dentro de este conjunto de países se encuentra un pequeño país donde se destina el presente proyecto, Gambia.

La república de Gambia se considera como uno de los países más pequeños en el Oeste africano, con una superficie aproximada de 11000 km², rodeada por Senegal y con 60km de

costa al Océano Atlántico. Dicho territorio debe gran parte de su historia a su colonización por parte del Imperio Británico, lo que supuso que el país se convirtiera en lugar de tráfico de esclavos y foco de grandes conflictos con Senegal, territorio perteneciente a Francia en aquel entonces. En 1965 Gambia lograba la independencia y en 1970 se firmaba la primera constitución como país republicano y con elecciones para la presidencia. A pesar de ello, en el año 1994, un golpe de estado por parte de Yahya Jammeh instauró una dictadura militar que lo mantuvo en el liderazgo hasta el año 2017, reformando la constitución en el año 1996 y bajo un gobierno marcado por diversas polémicas debido, entre otras cosas, al tema de la censura, corrupción y opiniones contra el colectivo LGBT. No obstante, tras años de reelección, en el año 2017 pierde las elecciones contra Adama Barrow, actual presidente del gobierno, que llega con la idea de mejorar las relaciones internacionales y modernizar Gambia. Esto abre un frente en el tema energético, con proyectos ambiciosos y relaciones internacionales más estables. No obstante, con un pretexto histórico similar a los países del oeste africano, Gambia se sitúa actualmente bajo el umbral de los países de menor desarrollo, en el puesto 174 sobre 189 en el ranking de índice de desarrollo humano. En virtud de esto, entran también en escena proyectos de cooperación junto a otras organizaciones internacionales (Banco Central Europeo, Fondo Monetario Internacional,...) tratando así de rescatar una economía que aún se caracteriza por su inestabilidad. Así, este último año 2019, el país contó con un PIB de 1760 millones de dólares (1450 millones de €), con un destacado crecimiento del sector terciario del 10% [2,3]. No obstante, la agricultura ha perdurado como el sector de mayor participación a lo largo de toda su historia y sigue funcionando como el motor nacional a pesar de las sequías y temporales sufridos, en parte, como consecuencia al cambio climático ocurrido a lo largo de estos últimos años.

2.2 Actividades principales en Gambia

Tal como se introducía en el apartado anterior, la agricultura se considera a día de hoy el sector de mayor peso en Gambia, situándose entorno al 23% y 30% sobre el PIB nacional. Este valor suele mostrar una gran dependencia sobre el clima, lo cual ha ocasionado diferentes contratiempos que afrontar. Los cultivos en Gambia cuentan con una gran variedad, que difieren principalmente en función de la demanda y características climatológicas (Mijo, maíz, maicillo, arroz, maní, algodón, sésamo, ...). Tras la recolecta de los cultivos, estos sufren procesos de transformación para poder mejorar su conservación y venta. Mencionar que el proceso de molienda de cereales es una actividad que necesita aún

a día de hoy de elaboración humana, actividad generalmente realizada por mujeres y chicas jóvenes, y consiste, junto a la recolecta de agua y demás tareas domésticas, en la inversión de una gran parte de su tiempo diario, lo que provoca que dispongan de una cantidad de tiempo libre muy inferior a la que sería posible con el soporte de máquinas.

Por otro lado, Gambia comparte su nombre precisamente con el río Gambia, que cruza y divide el país, desembocando al oeste del territorio en el Océano Atlántico. Las características de la entrada del río Gambia, en relación a sus nutrientes, provoca que la zona de desembocadura se convierta en atracción para una gran diversidad de especies marinas como zona de alimentación o procreación, convirtiéndose en una de las zonas de pesca de mayor enriquecimiento a nivel mundial. Los diferentes pueblos gambianos, principalmente en la costa, y países como Senegal, han sabido aprovechar la oportunidad y se ha originado una gran infraestructura entorno al sector pesquero, con un total de 20 empresas y 8 fábricas certificadas en la nación para exportar sus productos a países de la Unión Europea y suponiendo el pescado entorno al 40% de la proteína animal consumida en Gambia. [4]

Por último, mencionar actividades que han ido apareciendo con el paso de los años. Uno de los más importantes consiste en el bombeo de agua para abastecer así los lugares que no cuentan con acceso directo a agua potable. De esta manera se consigue ahorrar mucho tiempo y esfuerzo que podría invertirse en otras actividades, asegurando además un suministro esencial como es el del agua corriente. Por otro lado también la aparición de servicios como tercer sector económico, junto a este aparecen aplicaciones eléctricas como la de centros para recargar la batería del móvil, televisiones comunitarias, peluquerías, centros de ocio, etc.

2.3 Pobreza energética

Con todo lo expuesto, el desarrollo de un país como Gambia y sus actividades precisa de abastecer sus necesidades energéticas, dado que la gran mayoría de sectores descritos previamente no cuenta con suficiente respaldo energético. La recolección de las cosechas, molienda de grano o conservación del pescado u otros alimentos son algunas de las actividades más importantes en el país, y que cuentan con un gran margen de mejora en el

caso de complementar las actividades con máquinas que optimicen el tiempo respecto a la labor humana.

El paso de los años impulsó el uso de combustibles fósiles en lugar de madera en el mundo, logrando un desarrollo humano que en Gambia está llegando de manera más desacelerada, debido a la actual pobreza energética. Una pobreza que concluye en únicamente un abastecimiento eléctrico del 45% de la población según la IEA. Las actividades diarias de los habitantes gambianos son entonces, principalmente en las zonas rurales, suscitadas a usar madera, lo que provoca una deforestación desmesurada para una generación ineficiente, contaminante y peligrosa. Esto supone un freno para el desarrollo del territorio, y se convierte en un problema que debe ser solucionado por fuentes de generación limpias y de mayor densidad energética, apostando por un abastecimiento más extenso en el país. [5]

2.4 Electrificación nacional

National Water and Electricity (NAWEC) aparece en el año 1996 como sustituto a Gambia Utilities Corporation como la principal entidad pública al cargo de la generación y distribución de la electricidad del país. Esto explica que una gran fracción de los recursos energéticos se hayan destinado a proyectos de la entidad y ha sido determinante en la estructura de red actual situada en Gambia. Dicho esto, en el Anexo I se han agrupado las diferentes plantas de generación eléctrica existentes y conectadas a la red nacional, según el último reporte anual de 2017 publicado por PURA.

Estos datos resumidos en el Anexo I dan a entender la situación a la que se enfrenta Gambia, con más de un 50% de la población gambiana sin acceso a la electricidad. Por otro lado, la mayor parte de la potencia eléctrica instalada se encuentra en los alrededores del Greater Banjul Area (GBA), donde se concentra la mayor parte de la población y que pone por tanto como punto de abastecimiento prioritario, con una red más desarrollada tal como se ve más adelante. En el Anexo I además puede observarse que, debido al gran poder que tiene la corporación, la mayor parte de las plantas pertenecen a NAWEC, entidad que se encarga de la distribución de la electricidad, con pocas plantas que aún funcionan con una regulación independiente (IPP). La capacidad eléctrica instalada en la red de Gambia roza por tanto los 100MW, con una concentración de casi el 90% en los alrededores de la capital. [6]

Estos generadores conectados a la red, exceptuando un parque eólico en Batakunku, consisten en equipos antiguos y utilizados, con una vida extendida y que funcionan con fuelóleo pesado o diesel. Esto significa que Gambia se abastece de generadores con muy bajo rendimiento, con un alto consumo y mayor frecuencia de avería [7]. Además de esto, hay que tener en cuenta todos los inconvenientes que el uso de fuentes fósiles llegan a significar para el territorio de Gambia. Dicho esto, se dibuja un grid nacional concentrado principalmente en la zona GBA, logrando así mayores oportunidades en una de las zonas de mayor desigualdad social del país. No obstante, muchos proyectos de ampliación hacia zonas rurales aún no han visto la luz, lo que ha estimulado la búsqueda de soluciones para el abastecimiento de zonas aisladas del país.

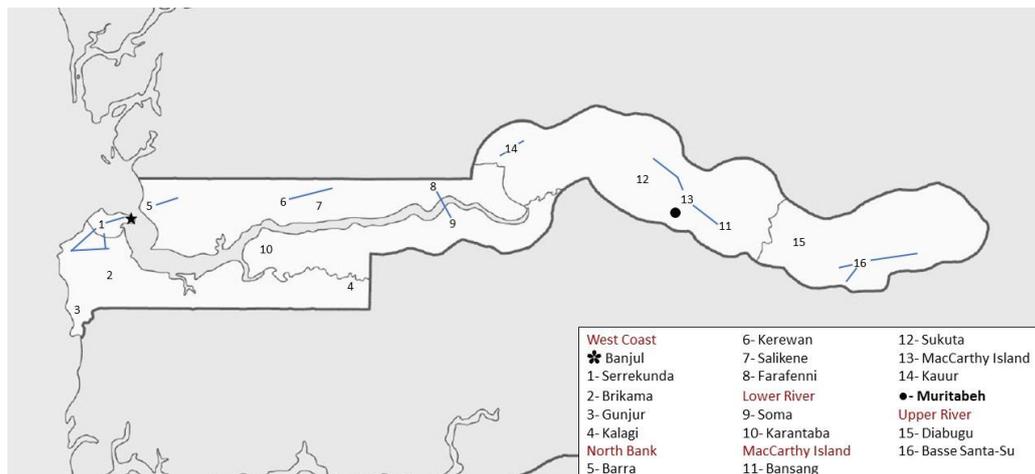


Ilustración 2.1.- Situación del grid nacional en el año 2012.

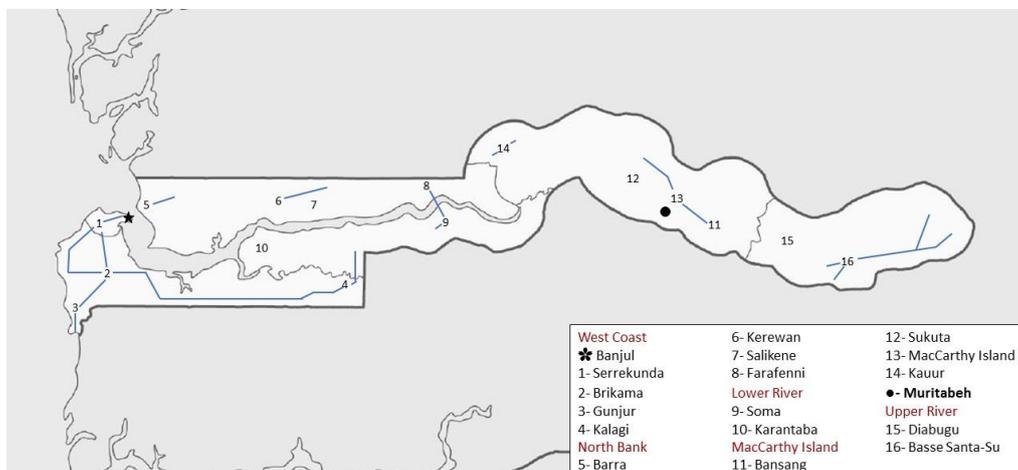


Ilustración 2.2.- Situación del grid nacional en el año 2017.

Como se ha comentado, en la Ilustración 2.2 puede observarse la concentración de infraestructuras en la zona cercana a Banjul, más conocido como el anillo eléctrico. Mientras tanto, zonas alejadas siguen esperando una respuesta por parte del gobierno para llevar a cabo la electrificación de esos territorios. Esta red, recordemos, supone la mayor concentración de potencia eléctrica instalada a nivel nacional. Cabe destacar además que la máxima tensión en la red apenas llega a los 33kV que, a comparación de tensiones utilizadas habitualmente de 230kV, como es en el caso de España, supone una gran pérdida de electricidad únicamente en su transporte. Esto supone el encarecimiento de una distribución eléctrica que ya encuentra dificultades para su contratación por parte de hogares, industrias o emprendedores.

A pesar de ello, la red eléctrica del país no piensa detenerse y va aumentando en función de los proyectos que se van instalando con el paso de los años. La conexión a micro-redes, proyectos comunitarios internacionales o nuevas plantas de generación, tanto renovables como fósiles, podrían marcar el devenir de las zonas que pudieran verse beneficiadas de la red nacional en los próximos años, pero que aún se estiman unos costes muy altos tanto para su desarrollo como para la contratación por parte de los habitantes. [5]

Por último, hay que mencionar que Gambia, a pesar de generar la mayor fracción de su energía desde combustibles fósiles, ha decidido dirigir sus pasos hacia los de otros países de África occidental, embarcándose en el desarrollo de energías renovables para nuevos sistemas de generación eléctrica. Para mayor veracidad, en Marzo del 2019, Ousainou Darboe, vicepresidente de la República de Gambia, lanza un programa para el desarrollo de energías renovables en el país. [8,9]

2.5 Distribución eléctrica: Oferta y demanda

A pesar de que en el año 2012 se estimaba para el año 2030 una capacidad de generación de 1184GWh [5], los cambios producidos en el país y el desarrollo de sistemas de generación descentralizada logran que para el año 2016 se presagie ya un mejor escenario de hasta 1341GWh para el año 2030. Esto sirve de contexto para la aceleración de una electrificación protagonizada por proyectos renovables, de entre los que destaca un importante proyecto de colaboración entre los cuatro países por los cuales discurre el río Gambia, nombrada como Organización del Desarrollo de la Cuenca del Río Gambia

(OMVG), para el aprovechamiento hidroeléctrico del río. Bajo la incertidumbre sobre la realización de este proyecto hidroeléctrico, en el Anexo II se ha resumido la tendencia eléctrica que propicia un escenario dependiente sobre el proyecto hidroeléctrico OMVG y un escenario independiente, en el que la realidad concluye que aún gran parte de la electricidad será producida desde combustibles fósiles, pero con una cada vez mayor presencia de energías renovables. [10]

A pesar de observarse un incremento de capacidad eléctrica, la realidad es que una generación de 304GWh en el año 2016 respecto a una capacidad del grid de 700GWh demuestra que las plantas de generación no están trabajando a pleno rendimiento. Esto dificulta, en mayor medida, el abastecimiento de una demanda eléctrica que crece exponencialmente. Dicho esto, se puede observar el incremento que significa la demanda de electricidad a nivel nacional en la Tabla 2.1, muy por encima de la generación eléctrica y que impulsa en mayor medida a una distribución más acelerada. [11]

Tabla 2.1.- Crecimiento de la demanda eléctrica a lo largo de los últimos años. [6]

	2006	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Demanda de potencia (MW)	78	126	132	147	152	160	166	173	184
Demanda eléctrica (GWh)	369	596	622	647	686	735	794	862	931

La infraestructura energética resultante es aún una incertidumbre en Gambia. A pesar de ello, proyectos como el hidroeléctrico propuesto por OMVG, un aumento de generación on-grid desde la planta de Brikama (fuelóleo) [12] o un parque fotovoltaico por parte de Sahay Solar [13], concluyen en que diferentes direcciones son posibles para la electrificación del país. En el Anexo III pueden verse resumidos algunos de los escenarios probables, pero que dependen, en gran medida, de empresas inversoras o asociaciones extranjeras. No obstante, hay que destacar las buenas condiciones que encuentra Gambia para el desarrollo de tecnologías renovables en el territorio.

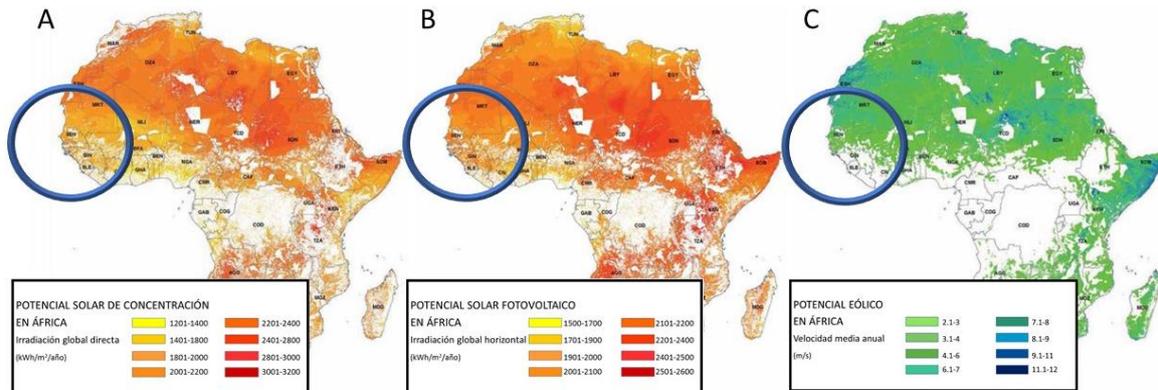


Ilustración 2.3.- Recurso renovable en Gambia. A) Solar de concentración, b) solar fotovoltaico, c) eólica. [14]

2.6 Energía solar y M'Bolo Association

El sol, de una forma u otra, se trata de la principal fuente de energía en el planeta. A pesar de que su aplicación como generador de electricidad o calentador de fluidos es bastante actual, el mundo animal y vegetal lleva utilizándolo desde el inicio de los tiempos para sus procesos biológicos, como la alimentación o fotosíntesis. Otros ejemplos son otras fuentes energéticas utilizadas por la humanidad hasta el día de hoy. Las fuentes fósiles provienen de materia vegetal descompuesta hace años, que sufrieron procesos relacionados con el sol y almacenaron dicha energía que se utiliza actualmente, la biomasa es un ejemplo muy similar a esa conservación de energía solar en las plantas. La energía eólica también debe su existencia a la energía proveniente del sol, y es que las corrientes de temperatura provocadas en el aire son las que ofrecen esas corrientes de viento que son posteriormente aprovechadas mediante aerogeneradores. Otro proceso provocado por la energía solar es la evaporación del agua, que discurre por las montañas al llover y que es aprovechado en centrales hidroeléctricas. Una vez dicho esto, únicamente aclarar que la energía fotovoltaica no es más que un método simple y elegante para el aprovechamiento directo de la energía proveniente del sol, de manera que no se tenga que ver transformada por procesos indirectos como los mencionados previamente.

África históricamente se ha presentado como un territorio brillante en cuanto a recepción de energía solar. Exceptuando el centro del continente, donde existen abundantes temporales lluviosos, la irradiación alcanza valores muy altos y constantes en el resto de zonas a lo

largo del año. Principalmente la zona este del continente se caracteriza por sus óptimas condiciones para el aprovechamiento solar, no obstante, el oeste africano también cuenta con valores de irradiación globales muy altos pero con valores de irradiación directa menores, lo que complica la instalación de generadores termosolares pero sigue cumpliendo con unas muy buenas condiciones para la generación fotovoltaica. Gambia, situado al oeste de África, estima un valor anual medio de irradiación global horizontal de 2300kWh/m² según IRENA (2014), que lo califica como una ubicación muy adecuada, cerca de un rango de condiciones excelentes, tal como se mostraba en la Ilustración 2.3. [14]

Además de unos valores altos de irradiación, el país cuenta con una aportación solar muy constante a lo largo del año. Con una latitud y longitud aproximada de 13,5° y -16° respectivamente, Gambia se sitúa dentro de la zona intertropical, por lo que el comportamiento del sol varía en menor medida. El país cuenta así con una duración mínima del día de 11.5 horas en el solsticio de invierno y una duración máxima de 12.5 horas en el solsticio de verano. Esto produce por tanto un escenario muy adecuado para la implantación de sistemas de aprovechamiento solar, donde combatir irregularidades de luz solar significa una tarea más sencilla.

Es cierto que en un continente como África se pone en duda si lo correcto es optar por unas políticas de generación limpias y con unos resultados a larga instancia, donde la prioridad es buscar sistemas productores de electricidad que puedan abastecer a gran parte de la población, de manera segura y con el menor coste posible [15]. No obstante, la energía solar ha demostrado ser ya una opción competitiva y además cuenta con la gran ventaja de no necesitar de una fuente que haya que importar como es el caso del Diesel, por lo que consiste en una tecnología que permite un ahorro de costes y una gran independencia, mostrando de esta manera características idóneas para este tipo de instalaciones off-grid.

Esto ha significado una oportunidad para apostar por un desarrollo social, humano y sostenible por parte de M'Bolo Association. Esta asociación con participación en Gambia y Senegal involucra sus esfuerzos en diferentes proyectos que emplean la energía solar para desarrollar así sistemas de generación descentralizada y formar jóvenes mujeres que adquieran la capacidad de participar en la cadena de montaje de esta tecnología.

La asociación surgida en el año 2010, inicia su participación en proyectos de electrificación para crear, entre otros, puntos de agua o participar en actividades populares en el país como la agricultura y la pesca, involucrándose en diferentes ámbitos como la salud, educación y el desarrollo de los habitantes de Gambia.



Ilustración 2.4.- Mujeres de M'Bolo Association en una instalación solar PV.

2.7 Cultivant Vida

Cultivant Vida consiste en la segunda organización involucrada en la colaboración que ha llevado a cabo este proyecto. Consiste en una organización que, con unos 10 años de vida y fundada por Xavi Galindo, se ha centrado a lo largo de estos años en el desarrollo de proyectos de cultivos y sanidad.

La moringa y otras plantas con grandes propiedades son utilizadas por la organización de Xavi para poder tratar la malnutrición y una larga lista de enfermedades en Gambia. Desde el año 2011 la organización sitúa su sede en Muritabeh pero logra expandir su producción y conocimiento por los diferentes países de África occidental. La construcción de dos hospitales y uno rehabilitado, nueve colegios, 250 pozos y más de 100 terrenos con cultivos, son algunos de los proyectos de Cultivant Vida, los cuales consiguen conectar la medicina natural desde los cultivos hasta el impulso de la educación del país. A estos proyectos se les suma un proyecto de huerto escuela, que se ubica en el terreno sobre el que se localiza el presente proyecto, enlazando la idea de producir moringa a la vez que se presenta como

lugar de exposición, con función educativa para niños y jóvenes que quieran introducirse en el mundo de la plantación de cultivos.

2.8 Árbol de la vida: *Moringa oleifera*

El consumo ineficiente de vegetales y fruta causa 2.7 millones de muertes al año alrededor del mundo, situando la malnutrición dentro de los 10 principales factores de riesgo que contribuyen a la mortalidad. La zona tropical es la más castigada en cuanto a suministros, donde la región de África Sub-Sahariana cuenta únicamente con el 43% de suministro vegetal respecto a las necesidades poblacionales. A pesar de que en la región cientos de vegetales y cultivos son consumidos, tan solo 20 especies de vegetales son producidas en sistemas de cultivo intensivo.

La necesidad de incrementar el uso y consumo vegetal en el territorio suscita entonces al aprovechamiento de la moringa. El conocido ya como el árbol milagroso, con origen en India y Pakistán, la moringa se ha establecido como uno de los vegetales fundamentales en la cultura Sub-Sahariana, incluyéndose en el Kit de Semillas Nutricionales suministrado por el centro mundial de vegetales (AVRDC).

La especie de moringa más extendida es la *Moringa oleifera*. Su hoja cuenta con unas excepcionales propiedades como se muestra en la Tabla 2.2, con aplicabilidad tanto en medicina como en alimentación. Estas propiedades difieren principalmente en función de la localización del cultivo, donde la temperatura media y pluviometría anual muestran diferencias en la moringa producida. A pesar de esta variabilidad de sus características, las hojas de *Moringa oleifera* cuentan, en general, con altos valores de antioxidantes y nutrientes, lo que le permite equipararse a otros populares alimentos de alto valor nutritivo. Estas propiedades además consiguen que la moringa, entre otros muchos de sus usos, sea provechoso para prevenir infecciones por virus de inmunodeficiencia humana [16] o curar cánceres. [17]

Tabla 2.2.- Propiedades de las hojas de *Moringa oleifera*.

	<i>Moringa oleifera</i>		Alimentos con grandes valores nutritivos
	Hojas frescas (g/100g FW)	Hojas secas (g/100g DW)	
Materia Seca	25,0-31,5	88,9-95,0	
Proteína	7,7-20,9 ^{a,b}	9,38-29,8 ^{a,c}	
Antioxidantes	(mg/100g FW)	(mg/100g DW)	(mg/100g)
β-Caroteno (Vitamina A)	8,5-28,4 ^{d,e}	13,5-63,0 ^{d,f}	Zanahoria: 7,4 ^f
Ácido Ascórbico (Vitamina C)	20,0-825,1 ^{e,g}	3,0-245,1 ^{b,g}	Chile: 173,8-280,0 ^m
α-Tocoferol (Vitamina E)	0,0-7,2 ^h	55,3-74,5 ^{f,h}	
	(mg GAE/100g FW)	(mg GAE/100g DW)	(mg GAE/100g FW)
Fenoles	683,4-2437,2 ^k	2648,0-8490,0 ^k	Fresas: 170,0-320,0 ^k
Nutrientes	(mg/100g FW)	(mg/100g DW)	(mg/100g)
Hierro	1,9-16,0 ^m	9,5-27,8 ^m	Lentejas: 7,3-9,0 ^m
Calcio	38,0-739,0 ^m	486,0-4000,0 ^m	Sésamo: 1000,0 ^m
Abreviaciones: ^a Procedimiento AOAC 981.10, ^b Procedimiento AOAC (2000), ^c Método micro-kjeldahl, ^d Procedimiento AOAC 980.45, ^e Extracción + DPPH, ^f Procedimiento AOAC 992.06, ^g Procedimiento AOAC 967.21, ^h Procedimiento AOAC 971.30, ^k Método Folin-Ciocalteu, ^m Espectrofotómetro de absorción atómica. FW=Masa Húmeda, DW=Masa Seca			
[18,19,20,21,22,23,24]			

Su cultivo además no es complicado, tal como se explicaba previamente. No necesita de abundante agua pero sí un suelo permeable que permita llegar al agua hasta las raíces, de dirección muy vertical. Esto le permite sobrevivir en las épocas más secas del año y su resistencia al calor también le permite un gran crecimiento a lo largo de los meses Julio y Agosto, donde aparecen las lluvias abundantes.

Esta subsistencia a lo largo del año logra modificar las características de la biomasa obtenida, características que también se ven modificadas mediante el desbroce del árbol a diferentes alturas, pudiendo llegar hasta los 12 metros, permitiendo otros rangos y velocidades de madurez, la más habitual es 1.5 metros. A pesar de ello, puede concluirse que la mejor estación para una mayor producción de *Moringa oleifera*, con unos valores

nutritivos excepcionales, se da en el periodo de lluvias en verano, durante los meses de Julio y Agosto, periodo que se estima como el periodo de mayor consumo eléctrico. [22]



Ilustración 2.5.- *Moringa oleifera*. A la izquierda hojas y flores, a la derecha vaina compuesta por semillas.

Además de las propiedades de las hojas previamente expuestas, la moringa cuenta también, una vez ha madurado la planta, con flores y vainas que salen desde ellas. El árbol de moringa florece y produce semillas a partir de los 8 meses, llegando a valores de 1000-1600 semillas producidas por cada árbol, anualmente [25]. Las semillas se encuentran dentro de las vainas, semillas oleaginosas con aproximadamente un 28%-42% de aceite en peso y con una fina cascarilla que las envuelve.

Las semillas, con un peso aproximado de 0.3g, vienen en grupos de 12-26 por vaina y tienen una forma esférica, con una cascarilla en forma de tres “alas” rodeándola en ángulos de 120°, tal como se ve en la Ilustración 2.5 [26]. Tras la habitual extracción del aceite, resta una torta en estado sólido con una gran cantidad de proteínas, acompañado por carbohidratos y fibra en menor medida.

Es decir, la moringa se trata de un árbol compuesto por ramas, hojas, flores y frutos repletos de semillas y todos estos componentes son aprovechables para diferentes usos. Sus hojas y ramas se consideran una gran solución como forraje para el ganado, pero también se ha visto implementado su uso en alimentación humana e incluso medicina, como tratamiento contra la diabetes o para el colesterol, entre otros muchos. Las flores no tienen un uso específico pero sitúan los frutos que contienen las semillas. Lo habitual es separar las semillas de las vainas de manera manual para extraer así el aceite posteriormente. Existen

trabajos sobre la utilidad de la materia restante, las cáscaras de vaina y cascarilla de la semilla, como agente adsorbente en el tratamiento de aguas y fuente de carbón activo, respectivamente. Las técnicas más populares para la obtención del aceite son el prensado frío y la extracción con n-hexano, obteniendo un rendimiento del 69% y 99%, respectivamente. La biomasa restante también puede utilizarse como alimento debido a sus buenas características, el aceite en cambio, cuenta con propiedades muy similares al aceite de oliva para frituras, aunque también se le han adjudicado buenas cualidades para producir combustible biodiesel o cosméticos. [26]

2.9 Moringa en forma de combustible

El árbol de la moringa, en su totalidad, además de las aplicaciones previamente descritas, consiste en biomasa aprovechable para producir combustible. Por un lado, Godino, et al. (2013) exponían en su trabajo la posibilidad de utilizar directamente las hojas de moringa para la producción de pellets. Un proceso que consiste en una sencilla secuencia de etapas compuestas por una etapa de exprimido de la biomasa, triturado, secado y una compactación final mediante glicerol en una relación 1:10 en peso. Logrando unos pellets de características caloríficas bajo el rango habitual de especies de biomasa de origen similar [27]. Tal como se ha observado en otras plantas, este proceso de peletización puede llevarse a cabo sobre otros materiales que pudieran quedar como residuo en el procesamiento de la moringa. En este caso, el rápido crecimiento y las grandes dimensiones que alcanzan estas plantas que llegan a superar los 20 años de vida, muestran la gran densidad energética con la que cuentan los materiales provenientes del árbol. Existe también la posibilidad de generar tanto Biogás como Bioetanol desde la planta de la moringa, pero que actualmente cuentan con menor apoyo. [28,29]



Ilustración 2.6.- Pellets de hojas de moringa.

Por otro lado, la alternativa que más atención ha acaparado a nivel académico, precisamente por su futuro prometedor, es la de aprovechar las buenas características del aceite de la moringa para la generación de Biodiesel, tal como se ha observado en otros casos como la *Jatropha Curcas*. Por ello, es interesante mencionar que el aceite extraído desde las semillas, conocido como aceite de Behen, presenta, además de las características antes descritas, unas propiedades muy llamativas para convertirse en un combustible energético. Tanto el prensado frío como la extracción por n-hexano consiguen un aceite de propiedades específicas, pero ambos, mediante sus respectivos procesos de pretratamiento, son aptos para ser transformados en biodiesel mediante el proceso de transesterificación [26,29]. De esta manera se consigue un combustible líquido como sustituto directo al diesel convencional, que cuenta además con uno de los más altos índices de cetano, 67 [30], además de un poder calorífico inferior muy superior a la que pueden ofrecer los recursos sólidos. De este modo, se estima un ratio del 0.96-1 de producción Biodiesel respecto al volumen de aceite moringa, mediante el uso de metanol [29,31]. Además de esto, la producción in situ de este biodiesel proporcionaría a Gambia una mayor autosuficiencia, pudiendo reducir la dependencia sobre el diesel que existe en el país y con un recurso directamente sustituible en las aplicaciones de este último. Es más, su estado líquido es otra de sus ventajas, facilitando así su transporte por el territorio.

2.10 Correlación para la estimación del poder calorífico

Dentro de las biomásas con propósito de ser utilizadas a modo de combustible, ninguno de los recursos sólidos obtenidos desde la moringa cuenta aún con una gran popularidad a nivel mundial como fuente energética. La mayor parte de la investigación existente se ha concentrado en la transformación de sus hojas, mientras que sus otras variantes tienen aún un largo camino que recorrer.

A pesar de ello, los intereses mundiales han cambiado a lo largo de los últimos años. Uno, impulsado por el cambio climático provocado por la explotación de combustibles fósiles, ha sido el incremento de interés en la búsqueda de fuentes de generación más limpias. A causa de este aumento de interés, la correlación desarrollada por Channiwala y Parikh (2002) para el cálculo del poder calorífico ha servido como modelo para poder analizar la capacidad energética comprendida en los recursos de la moringa mostrados en el presente trabajo. Para la estimación calorífica de los recursos sólidos de biomasa, hace uso de la

composición química que contiene cada uno de estos materiales, obtenida mediante análisis elementales. [32]

$$PCS \left(\frac{MJ}{kg} \right) = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211A \quad (2.1)$$

($0\% \leq C \leq 92.25\%$, $0.43\% \leq H \leq 25.15\%$, $0\% \leq O \leq 50\%$, $0\% \leq N \leq 5.6\%$, $0\% \leq S \leq 94.08\%$, $0\% \leq A \leq 71.4\%$)

Donde, C, H, O, N, S y A representan las fracciones másicas en base seca de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas en el material.

El valor de poder calorífico es una de las propiedades más importantes de la biomasa, especialmente cuando se dispone como fuente energética. Este valor se puede exponer con el nombre de poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico inferior (PCI), en función de si la energía de condensación del vapor de agua está incluido o no en su cálculo. Otra manera de expresar estos valores son el poder calorífico bruto (PCB) y el poder calorífico neto (PCN), respectivamente. Precisamente por este motivo, resulta interesante obtener los valores de poder calorífico inferior de los combustibles que son analizados en el presente proyecto. De este modo, se determina de una manera más realista la capacidad de generación que presentan los recursos analizados. No existen muchas referencias acerca del poder calorífico inferior de los pellets de biomasa, por lo que se ha utilizado una relación genérica aplicable para combustibles de biomasa. Relación entre el PCI y PCS presentada en el trabajo realizado por la U.S. Environmental Protection Agency (2007), donde se muestra una gran dependencia sobre el contenido en vapor de agua, tal como se esperaba y por lo que se destaca la importancia de un buen proceso de deshidratación. [33]

$$PCI \left(\frac{MJ}{kg} \right) = PCS \left(\frac{MJ}{kg} \right) - \frac{10.55 \cdot (H_2O + 9H) \frac{Btu}{lb}}{430 \frac{Btu \cdot kg}{lb \cdot MJ}} \quad (2.2)$$

Donde H₂O y H hacen referencia a las fracciones másicas de humedad e hidrógeno en el combustible, respectivamente.

2.11 Tecnología de generación auxiliar

El procedimiento habitual para la transformación de la energía térmica producida desde la biomasa en electricidad es la de incorporar un ciclo Rankine que aproveche, mediante una turbina y un generador, el calor absorbido por el vapor. No obstante, el ciclo Rankine encuentra su enfoque en sistemas a gran escala. Esa no es la finalidad en este caso, por lo que, para seguir adelante con el proyecto, se han analizado alternativas al sistema tradicional que se han resumido en la siguiente tabla.

Tabla 2.3.- Procesos termoquímicos de generación eléctrica desde biomasa. [34,35]

	Rango de potencia (kW)	Eficiencia eléctrica (%)	Eff. cogeneración (%)
Ciclo convencional Rankine	500-100000	20-30	85-93
Ciclo orgánico de Rankine (ORC)	2-10000	10-30	~85
Motor Stirling	1-7,5	20-40	80-90
Gasificación	10-100	7-19	<80

Como puede observarse en la Tabla 2.3, existen diferentes alternativas más adecuadas para sistemas de menor potencia. El incremento de popularidad de sistemas de generación descentralizados ha provocado el asentamiento en el mercado para algunas de estas tecnologías, de entre los que destaca el ciclo orgánico de Rankine (ORC) como el proceso más popular para sistemas de reducida producción energética. Esto se debe a su gran característica modular y una gran madurez tecnológica a raíz de encontrar similitudes con los ya desarrollados sistemas de Rankine tradicional y refrigeración, lo que ha servido de premisa para la selección de esta tecnología como el sistema más fiable para el presente proyecto. [36]

La tecnología ORC se ha desarrollado hasta el punto de superar una capacidad instalada de 2.8GW a nivel mundial, de los que 4.95MW corresponden a pequeños sistemas de 1-100kW [37]. Con el ciclo tradicional de Rankine como origen, el ORC sustituye el vapor de agua clásico por un fluido orgánico, los cuales se dividen en dos principales grupos, los hidrocarburos y los refrigerantes. Todos ellos se distinguen del agua en que necesitan

menor energía para ser evaporados, lo que favorece su utilización a bajas potencias. Como consecuencia, condiciones menos severas son favorecidas en el sistema, por lo que la durabilidad de los equipos se ve beneficiada y se dispone de un sistema más seguro. Por otro lado, estos fluidos son caracterizados por contar con parámetros críticos más limitados, por lo que es común incorporar un circuito previo de aceite entre el horno y el intercambiador de calor [38]. Acoplado a este circuito de aceite, el circuito del fluido de trabajo es similar al Rankine convencional, con algunos redimensionamientos que pueden deberse a las características propias de este tipo de fluidos, como la temperatura de ebullición o volumen específico. Por último, el tercer circuito que completa el sistema ORC es el referente al sistema de condensación. A continuación, se muestra el esquema de un sistema de cogeneración mediante un sistema ORC en el que pueden observarse los circuitos que contempla.

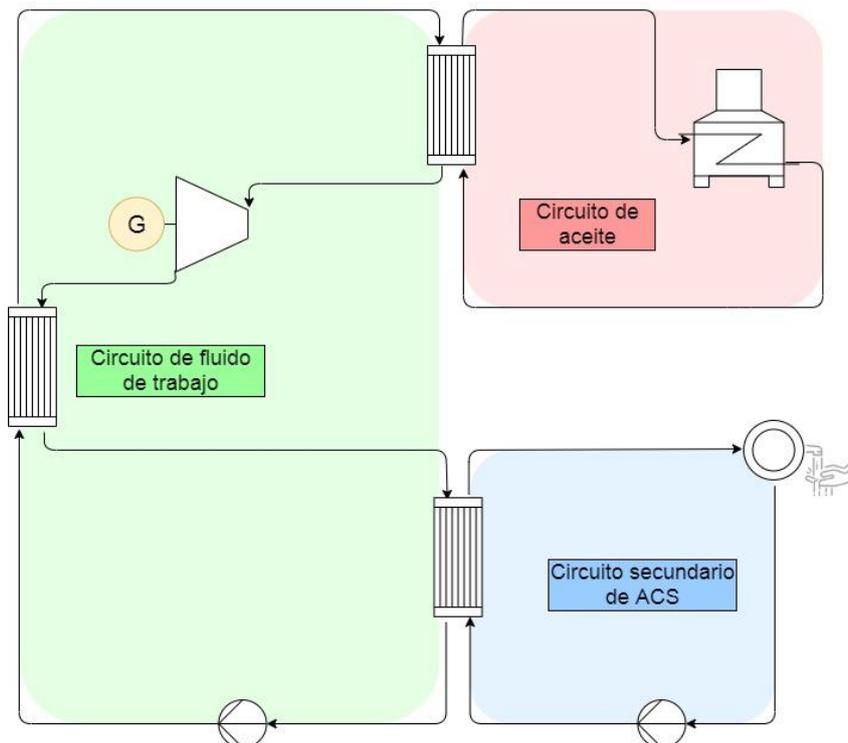


Ilustración 2.7.- Diagrama de un sistema ORC con regeneración.

Dentro de las propiedades de los fluidos orgánicos, resumidos en el Anexo VI, el más destacado para entender la popularidad de estos compuestos es su capacidad de poder ser empleados sin la necesidad de alcanzar el estado de gas sobrecalentado. Esto se debe a que su curva de saturación cuenta con una pendiente positiva. Esta característica, que no se encuentra en el caso del agua, denomina a estos compuestos como fluidos secos, por lo que evita la formación de humedad en el sistema que pueda dañar los álabes de la turbina u otros puntos del circuito. De esta manera, no es necesario tampoco alcanzar altas temperaturas de sobrecalentamiento para llevar a cabo el proceso de expansión, es más, se fomenta la expansión del fluido desde un punto saturado y, por lo tanto, es posible incrementar su eficiencia a la vez que se reduce el consumo energético. La salida desde la expansión, no obstante, si encuentra el estado sobrecalentado, por lo que la incorporación de un regenerador o intercambiador de calor interno permite aprovechar el excesivo calor de este gas como precalentador del fluido de entrada al vaporizador, tal como se observa en la Ilustración 2.7 y producir así un incremento en el rendimiento del ciclo. [39,40]

Tal como se ha observado, la selección del fluido de trabajo se considera una de las claves a la hora de diseñar un sistema ORC. Partiendo de la base de que no existe un único fluido óptimo para cada uno de los procesos ORC, sí que los hay los que consiguen casar de mejor o peor manera sus propiedades con unas específicas condiciones de trabajo. Por lo habitual, una mayor masa molar induce a un mayor valor de temperatura crítica, característica donde los hidrocarburos destacan sobre los refrigerantes. Esto provoca que los hidrocarburos, en general, sean más populares en aplicaciones de alta temperatura, mientras que los refrigerantes, que cuentan con mejores características medioambientales y de seguridad, son los más utilizados en aplicaciones de menor temperatura [39,41]. En la siguiente tabla se muestran las propiedades generales de los dos grupos principales de fluidos utilizados en el ORC, con dos de los ejemplos más populares utilizados para cada uno de los casos.

Tabla 2.4.- Clasificación de fluidos de trabajo.

	Refrigerantes	Hidrocarburos
Propiedades termodinámicas		✓
Menor toxicidad	✓	
Menor inflamabilidad	✓	
Salud y medioambiente	✓	
	R245fa	Tolueno
Fórmula química	CF ₃ CH ₂ CHF ₂	C ₆ H ₅ CH ₃
Punto de ebullición (°C)	14,9	110,6
Temperatura crítica (°C)	154	318,8
Presión crítica (bar)	36,4	41,3
Masa molar (g/mol)	134,05	92,14
Potencial de agotamiento de ozono (ODP)	Nulo	Nulo
Potencial calentamiento global (GWP 1020)	Bajo-medio	Bajo
Toxicidad	Sí	Sí
Inflamabilidad	No	Alto
[42,43,44]		

Así pues, la tecnología ORC permite trabajar a un ritmo de generación más apropiado para el presente proyecto, obteniendo además costes de mantenimiento reducidos. Asimismo, no necesita sistemas de tratamiento del agua ni desgasificadores. Su temperatura y presión de trabajo menores favorecen además su comportamiento de arranque y parada, ofreciendo mayor flexibilidad y seguridad. Tras extraer parte de su energía, el flujo de salida de la turbina puede, o bien condensarse a temperatura ambiente, o aprovecharse para un circuito adicional de calentamiento de agua caliente sanitaria. Existen múltiples aplicaciones de esta tecnología, debido a la posibilidad de aprovechamiento de diferentes fuentes térmicas que comprenden desde los 80°C hasta 350°C [40]. No obstante, el rendimiento y precio de esta tecnología juegan un gran papel en la viabilidad de esta tecnología.

2.12 Características de la tecnología ORC

A continuación, se profundiza en las condiciones de trabajo que determinan la eficacia de un sistema de esta categoría en el proyecto que se viene presentando. Previamente se ha comentado brevemente la importancia en la selección del fluido de trabajo, no obstante, este

diseño comprende más variables, con el fin de obtener el sistema más eficiente posible. Para ello, del mismo modo que ocurre en el Rankine tradicional, la eficiencia global la determina la relación entre la energía eléctrica de salida y la energía térmica de entrada, factor que en este caso si sufre un mayor efecto proveniente del consumo de las bombas del circuito. [45]

Una vez observada la Ilustración 2.8 se puede entender que el rendimiento se vea favorecido por un fluido de alta presión y temperatura de vaporización a la entrada del expansor, etapa de expansión que corresponde a la línea 4-6. Por el lado contrario, una baja presión y temperatura tras la expansión también significan un incremento de generación. Para ello, entran en juego la velocidad de rotación de las bombas que determinan la presión y flujo de trabajo, junto a la entrada de calor y refrigeración ilustradas en los tramos 9-4 y 7-1, respectivamente, de la Ilustración 2.8. No obstante, estas decisiones pueden significar un exceso energético no aprovechado en la turbina que puede llegar a disiparse sin haber podido emplearlo o llegar a límites inferiores o superiores que el mismo sistema o fluido determinan, como lo son las condiciones críticas.

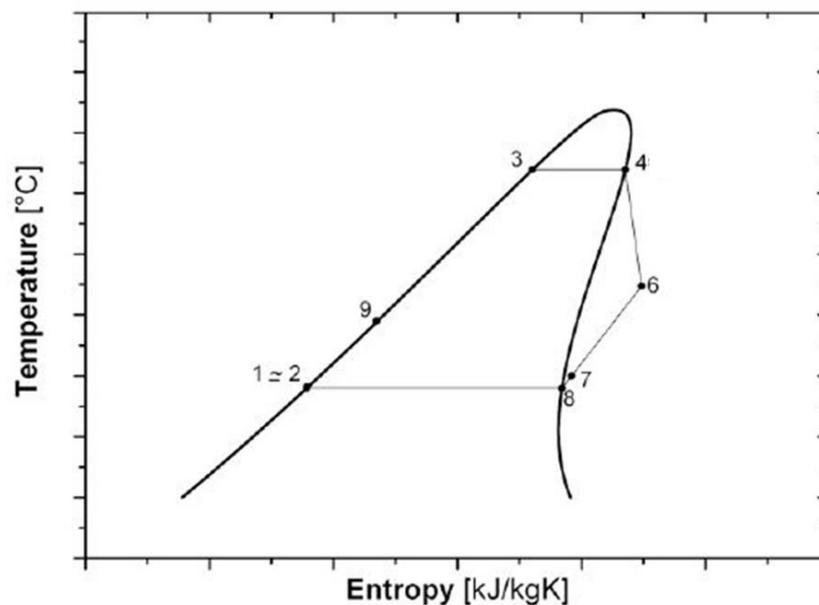


Ilustración 2.8.- Modelo de diagrama T-s con refrigeración en ORC. [78]

Bien es cierto, que varios trabajos realizados determinan que el sobrecalentamiento del fluido previo a la expansión es considerado como un consumo excedente de energía inadecuado, y encuentran, el punto de máximo rendimiento en la expansión desde un estado de vapor saturado del fluido, tal como puede observarse en el punto 4 de la Ilustración 2.8. [38,45]

Considerando todo ello, se procede a la selección y dimensionamiento de los componentes, en función de las propiedades descritas, como por ejemplo el volumen específico del fluido. No obstante, la tecnología ORC cuenta ya con un recorrido, el cual permite concluir unos equipos predilectos para su funcionamiento a bajas condiciones.

Tabla 2.5.- Equipos y características habituales en sistemas ORC.

Equipo	Comentarios	Clases utilizadas	Eff. (%)	Ref. Bib.
Intercambiador de calor	Su eficiencia reside en la superficie de intercambio de calor, lo que incrementa su coste.	Carcasa y tubo (Fluido frío de trabajo por el interior)		[39]
Condensador	$P_{min} > 0,05\text{bar}$ o presión de vapor.	Intercambiador de calor de placas soldadas		[46]
Expansor	Equipo de generación energética.	Expansor/compresor (revertido) de espiral.	80	[36,38,44,47]
Bomba	Consumo: ~10% de energía generada.	Bomba centrífuga.	80	[48,49]
Caldera	Variable en función de temperatura de trabajo.			[49]
Generador	Conversión energía mecánica en energía eléctrica.	Generador de inducción.	95	[49]

Por último, cabe destacar que la tecnología ORC destina la mayor parte de su precio a los equipos de intercambio de calor, el expansor y el fluido. A mayor rango de potencia se obtiene un precio proporcionalmente inferior, pero para casos de pequeña potencia, como es el presente caso, se estima un coste de inversión aproximado de 3500€/kW [41], con unos costes medios de mantenimiento del entorno a 750€/año en un sistema de 10kW. [50]

3 BENEFICIOS

Bajo este contexto, se observa que la energía influye profundamente en la vida de las personas. Es fundamental para prácticamente todos los aspectos del bienestar humano, incluido el acceso al agua, la productividad agrícola, la atención de salud, la educación, la creación de empleo, el cambio climático y la sostenibilidad ambiental. Con este proyecto, se desea incorporar un aporte energético sobre un proyecto destinado tanto a la educación como a la alimentación y la salud.

Ya se han mencionado las increíbles propiedades con las que cuenta la moringa, planta cada vez más popular y que se convierte en la pieza fundamental del huerto escuela. Este huerto escuela será además utilizado para educar a niños y adultos a formarse en labores agrícolas, y puedan aplicar lo aprendido para el desarrollo de más terrenos cultivables. Dicho así, el cultivo será posible gracias al abastecimiento eléctrico producido por el presente proyecto, realizado, además, mediante energías limpias que respeten el entorno natural.

La utilización adecuada de estas fuentes de energía combate además uno de los mayores problemas que asola la salud de los habitantes de la África Subsahariana a la hora de utilizar fuentes de manera no regularizada. Neumonía infantil, enfermedad pulmonar obstructiva crónica y el cáncer de pulmón son algunas de las consecuencias a evitar mediante el reemplazo de la generación irregular y una buena educación sobre sus utilidades. [51]

“Por supuesto, en un país donde abundan las fuentes de agua, habría que considerar soluciones hidroeléctricas. También, donde existan fuentes geotérmicas, las plantas geotérmicas deberían de considerarse primero. Por lo tanto, en un continente como África, debería de considerarse el uso de energía solar”.

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que se ha visto muy beneficiada con el paso de los años sobre su rentabilidad, principalmente debido a la disminución de su precio que le permite cada día estar más cerca de competir con otras fuentes de generación energética, el problema viene cuando no lo hace de manera homogénea. La zona de África Subsahariana no cuenta con los avances de otros lugares y puede llevar a dudar de si se considera una opción correcta, donde cuenta con unos costes de inversión elevados. [15]

A pesar de ello, ya se ha explicado la demanda de electrificación que sufren las zonas rurales de este territorio, donde se produce una generación imprudente bajo la exposición de los habitantes a recursos fósiles que llegan a ser tóxicos para su salud. La energía solar permite así enfrentar dicha problemática que, bajo el respaldo del programa de energías renovables impuesto en Gambia, puede imponerse como una de las principales tecnologías de generación autónoma, muy necesario en zonas alejadas de una red situada, principalmente, en los alrededores de Banjul.

Además, a pesar de que el diesel presente gran popularidad, lo cierto es que el país no cuenta con una infraestructura para su tratamiento, y a nivel continental hay una capacidad muy pequeña de refinado. Esto produce una gran dependencia sobre las importaciones en una generación que ya sufre de interrupciones a nivel local. La situación es por tanto la oportunidad de apostar y desarrollar los cimientos para una generación energética limpia y respetuosa con los intereses mundiales.

Aparece así la posibilidad de dar madurez al mercado solar fotovoltaico en el territorio, impulsando una mayor cantidad de instalaciones y poder así desarrollar, mediante industria y consultoría, una mayor competencia que abarate los precios. Todo ello en un continente como África, líder en reservas de Manganeso (80%) y propietario del 30% de todos los minerales a nivel mundial, materiales muy útiles en la fabricación de baterías.

Este proyecto es uno más de los diferentes proyectos llevados a cabo por M'Bolo Association, de profesionalizar jóvenes mujeres en el mundo de la energía fotovoltaica y empezar desde abajo una infraestructura de generación respetuosa con el medioambiente. En este caso además, consiste en una colaboración con la organización Cultivant Vida, que entre sus diferentes proyectos, este se enfoca también en conseguir un centro educativo que enseñe a personas de todas las edades a cultivar, a través de su huerto escuela.

Asimismo, este proyecto se sitúa como promotor de más proyectos energéticos sin la necesidad de esperar a una expansión de la red eléctrica en el país. La creación de sistemas de generación distribuida que puedan derivar a micro-redes o a una anexión a la red, se presenta como la opción más eficaz en una transición hacia las energías limpias. De manera que pueda también compaginar con la electrificación nacional.

Por último, pero no menos importante, la *Moringa oleifera* es una planta con unas asombrosas propiedades que cuenta aún con gran cantidad de posibles aplicaciones. Este proyecto ayuda a extender el conocimiento sobre las características que ofrecen los diferentes productos extraídos, con el fin de lograr maximizar la utilidad de esta planta. Se trata así de divulgar una producción que se muestra como solución a muchos de los problemas mundiales actuales, como pueden ser el hambre, las enfermedades y una solución a la emisión de gases de efecto invernadero.

Precisamente el aprovechamiento de toda la biomasa producida desde el árbol de cultivo se ha presentado como una opción muy atractiva para una generación auxiliar que permita una mayor seguridad de alimentación eléctrica al huerto. De esta manera, se ha propuesto llevar a la realidad un completo uso de este cultivo vegetal que va ganando popularidad con el paso de los años. De esta manera, se produce la hibridación del sistema de generación, obteniendo dos fuentes energéticas que puedan asegurar, de la mejor manera, la alimentación eléctrica a las labores producidas en el huerto escuela.

4 DESCRIPCIÓN DE REQUERIMIENTOS

4.1 Análisis del emplazamiento: Muritabeh

El emplazamiento donde se desarrolla el presente proyecto se encuentra en la zona central del país. Puede observarse en la Ilustración 4.1 e Ilustración 2.2 pero para ser precisos, el lugar cuenta con las siguientes coordenadas:

Latitud: 13.493°

Longitud: -14.817°

Este territorio se encuentra dentro de la región Central River, en un punto muy cercano a Janjabureh o MacCarthy Island. El pueblo se llama Muritabeh y actualmente cuenta con unos 400 habitantes. Este pequeño pueblo caracterizado por ser una población rural y aislada en el interior de Gambia, no cuenta con acceso a la electricidad ni al agua corriente, al igual que las zonas marginadas de Gambia, lo que se refleja en las altas tasas de mortalidad infantil y materna.

La asociación de Cultivant Vida, a manos de Xavi Galindo, decide entonces llevar a cabo un proyecto de huerto educativo en este pueblo de Muritabeh. Para ello, se instala en primer lugar un bombeo de agua a modo de suministro para personas y cultivos locales y poder lograr así comenzar a equipar un terreno de 0.25ha con lo mínimo indispensable para dar comienzo a su tratamiento.



Ilustración 4.1.- Localización del huerto escuela, en Muritabeh.

Previamente se han explicado las increíbles propiedades con las que cuenta la moringa, que se convierte precisamente en el cultivo principal de este huerto escuela localizado en Muritabeh. Esta planta que se consolida como parte fundamental de la dieta en toda la región Subsahariana, piensa crear además una red de empleo en el lugar, enfocado en hacer partícipes a los habitantes locales, tanto mujeres como hombres.

4.2 Procesos conectados a la generación energética.

La generación eléctrica supondría un sin fin de posibilidades en su uso, es decir, una vez instalada la plataforma de generación, el huerto escuela podría permitirse conectar diferentes equipos que pudieran facilitar la labor ejercida en el lugar. No obstante, siguiendo sistemas de procesamiento de la moringa ya existentes a día de hoy, se han tomado en cuenta un mínimo de equipos para estimar el consumo que pudiera haber en el huerto escuela [52]. Con lo explicado previamente y utilizando las características del emplazamiento, se ha estimado un consumo mínimo como fundamento para el diseño de su respectiva alimentación eléctrica.

Por lo tanto, para augurar una buena producción y distribución de la moringa hasta el punto de consumo habrá que equipar el terreno con todo el equipamiento necesario para el ciclo de vida del cultivo.

En este huerto, mediante las apropiadas condiciones meteorológicas y el cuidado realizado por los trabajadores, la moringa crece hasta llegar a su volumen de cosecha, llegando así el momento de recolección tanto del follaje o biomasa del árbol como de las vainas producidas, logrando separar dos grupos de productos.

Por un lado, se explicaban antes las buenas propiedades de la biomasa de moringa, permitiendo su aplicación en diferentes sectores. La producción de biomasa afortunadamente se distribuye a lo largo de todo el año, aunque la mayor producción de esta biomasa se produce a lo largo del verano, tal como se ve más adelante. Por lo tanto, su procesamiento debe contemplar todos los meses del año, con su consiguiente consumo eléctrico y capacidad de conservación.

El proceso utilizado habitualmente para la preparación de las hojas de moringa consiste en un pre-secado para su posterior triturado, etapa de tamizado y un secado final para

conservar la moringa deshidratada en un lugar seco que pueda prevenir un crecimiento bacteriológico en el producto ya preparado. De hecho, la moringa cuenta con más del 70% de humedad en peso y esto podría ser origen de un crecimiento bacteriológico y por tanto una rápida degradación del producto. Este valor por tanto debe de reducirse hasta valores mínimos, una deshidratación que de lugar a una biomasa con un máximo valor de 15% de humedad residual en el producto [53]. El proceso de secado es muy popular en el mundo de la agricultura, lo que ha permitido un gran abanico de opciones, entre los que destacan el uso de luz solar o secado bajo la sombra como el más popular y el uso de hornos, con los cuales se consigue acelerar el proceso de secado. A pesar de que el calor solar sigue siendo el más popular y económico, se ha demostrado que se obtiene una mayor conservación de las propiedades de la moringa mediante el uso de hornos, en rangos de 40°C y 60°C, para lograr así una mejor concentración de nutrientes [24]. Existe también una alternativa de cámara de secado solar, la cual aprovecha la energía solar para calentar un agua que se hace circular por un sistema de tuberías para mantener una habitación a una alta temperatura constante. Junto a la incorporación de un ventilador y extractor permite la entrada de un aire seco que irá extrayendo la humedad que se ve eliminada desde la moringa. [54]

El secado de la moringa modifica además su color y aspecto, siendo más común venderlo en forma de cápsulas para el consumo humano, por lo que es necesario un pulverizado de la biomasa. Esta manera de vender el producto es también favorecido para tratamientos médicos y a modo de forraje para el ganado. El triturado o molienda de la moringa es aplicado principalmente para facilitar su transporte y preparación. Habrá de escoger, eso sí, un proceso de molienda que cubra el ritmo de producción estimado. Para realizar esta molienda existen diversos equipos como el molino de martillos (hammermill) y el molino de corte (cutting mill). [24]

Tras el proceso de acondicionar la moringa para su mayor durabilidad, habrá que disponer de un sistema de conservación que ayude a mantener las propiedades de la moringa en el mismo terreno de cultivo hasta el momento de su traslado.

Además de la biomasa de moringa, el árbol produce vainas repletas de semillas, que pueden ser utilizadas para diferentes productos. Primero, se produce el descascarillado de estas semillas para separar las cascarillas o pieles del grano, una etapa que aún no cuenta

con un gran desarrollo para su mecanizado y es protagonizado por una labor humana. La producción de aceite Behén desde los núcleos de semilla es su finalidad más popular, para uso en cocina, industrial o la conversión a biodiesel de gran calidad bajo un proceso de transesterificación. Asimismo, la torta restante tras la extracción del aceite, cuenta con unas grandes propiedades proteicas.

Por último, mencionar que la producción íntegra de los consumibles desde el cultivo de moringa y la facilitación de agua para trabajadores y visitantes se realiza gracias a un bombeo desde un acuífero subterráneo. Este bombeo sirve para el abastecimiento del cultivo y todo el huerto escuela, para el que se ha diseñado un sistema de almacenamiento del agua con bidones. Además hay que mencionar que parte de la electricidad generada es destinada al hogar que se encuentra en el mismo huerto con cinco residentes.

Todas estas acciones consisten en una gran demanda eléctrica, que se abastece mediante el sistema que se propone en el presente proyecto. Llegamos así al momento de proponer un sistema que también tenga en cuenta la intermitencia de la generación solar, suplida mediante una generación auxiliar, punto que se desarrolla más adelante.

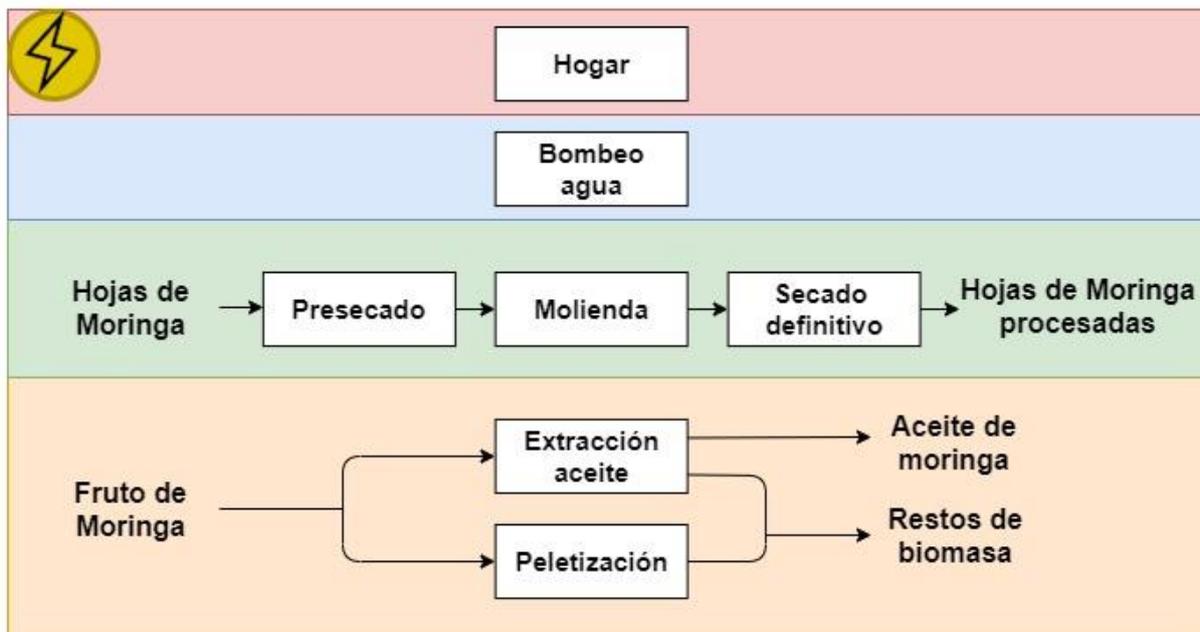


Ilustración 4.2.- Abastecimiento eléctrico en las líneas de trabajo.

5 FUNDAMENTOS DEL PROYECTO

En este apartado, se extienden los pasos que hay que afrontar para llevar a cabo el proyecto. Tal como se explicaba en los anteriores apartados, el proyecto consiste en una plataforma de generación que se ve alimentada por energía proveniente del sol y que tiene que ser transformada por elementos que hagan posible su utilización en los equipos conectados a esta plataforma, contando con una generación auxiliar que afronte las posibles interrupciones que puedan darse desde la generación solar. Es por ello, que para un proyecto de tal magnitud, el proyecto se ha enfocado en ciertos puntos para asegurar una generación eléctrica limpia, segura y con un buen aprovisionamiento.

5.1 Orientación de los paneles solares

Son la base de la instalación solar y en su diseño reside uno de los puntos con mayor importancia en el proyecto. Esta generación solar deberá afrontar una demanda oscilante a lo largo del año, en función de la época en la que se encuentre. Tal como se explicaba anteriormente, el objetivo del proyecto es lograr que las etapas en las que consisten el tratamiento de la moringa, cuenten con una alimentación suficiente en todo momento. Para ello, se han pensado diferentes alternativas en la orientación de los paneles solares.

- Colocación horizontal de los paneles solares.
- Optimizar la inclinación de los paneles solares en función de máxima generación anual.
- Desarrollar un sistema solar con seguimiento de sol (3D).

Exceptuando la última de las opciones, las primeras dos instalaciones encontrarán una orientación fija hacia el sur. Estas cumplen además con unas características de mayor similitud mientras que la última opción consiste en una tecnología que aún está en auge actualmente en países desarrollados.

Siguiendo las coordenadas en las que se encuentra Muritabeh, puede verse que se encuentra dentro de la zona tropical, por lo que contará con un recorrido solar bastante similar a lo largo del año. Esto provoca que la colocación en horizontal consista en una alternativa llamativa, donde los paneles ocuparían la superficie mínima para su colocación debido a que evitan la formación de sombras.

No obstante, estos valores de generación solar podrían verse incrementados mediante la inclinación de los paneles solares hasta una optimización de la generación solar total a lo largo del año. Este ángulo de inclinación se estima que sea pequeño, con una leve formación de sombra, debido a las coordenadas en las que se encuentra la localización.

Por último, es interesante ser conocedor de los valores que se obtendrían mediante un sistema que permita la máxima captación de energía solar a cada momento del día. Esta tecnología tiene un precio muy alto, incluso en países donde la tecnología solar está muy desarrollada, y es por ello que en un principio parte como la alternativa de menor viabilidad de las tres, no obstante, sus datos corresponden una gran fuente de información.

5.2 Desafío de la generación ininterrumpida

La utilización de energía solar como fuente principal de generación, hace que sea necesario escoger una fuente de generación auxiliar para suplir de energía el sistema en momentos de intermitencia eléctrica provocada por la generación solar. Ya sea por condiciones climatológicas u otras causas, existen periodos en los que los módulos solares no pueden abastecer la demanda eléctrica provocada por los equipos del huerto escuela. Dicho lo cual, se presentan a continuación las alternativas consideradas para el presente proyecto:

- Utilización de baterías de litio
- Generación mediante recurso diesel
- Generador mediante recursos derivados de moringa.

Las baterías se han presentado a nivel mundial, especialmente en los países más desarrollados, como la alternativa que mejor complementa a los sistemas fotovoltaicos, almacenando la energía solar en momentos de poca demanda eléctrica para poder aprovecharla posteriormente en momentos de mayor necesidad. Las baterías de plomo-acido y litio consisten en las dos opciones más populares de entre las baterías, de los que se ha seleccionado la alternativa de baterías de litio debido a su mayor durabilidad y mejor desempeño. No obstante, la tecnología de las baterías no es aún tan popular en los países menos desarrollados, con la gran ausencia de un mercado de baterías que posibilite que la tecnología cuente con precios competitivos. A su favor, las baterías de litio consisten en una alternativa amigable con el medioambiente, no generando ningún residuo durante su vida de uso. Las baterías consisten por tanto en una tecnología con mucho margen de mejora,

logrando capacidades de almacenaje cada vez mayores. En la región Africa Subsahariana (SSA), la incorporación de baterías en un sistema fotovoltaico llega a comprender un precio de hasta 3.50€/W, rondando el 26% del precio final de una instalación fotovoltaica off-grid. [55]

Por otro lado, el diesel se ha convertido en una opción muy popular para hacer frente a la problemática de estabilidad del grid en los países del SSA. Desde el punto de vista económico, los países africanos con reservas de petróleo y las empresas que lo extraen, obtienen mayor beneficio vendiéndolo a países fuera del continente. Así, el territorio cuenta con una muy limitada capacidad de refinado, lo que provoca que el cliente tenga que importar el combustible tratado desde el extranjero. Esto provoca una gran dependencia hacia otros países a la hora de recargar sus reservas y determinar el precio de dicho combustible [56]. El diesel se encuentra dentro del grupo de los recursos fósiles o no renovables y exhibe además una combustión fuente de gases de efecto invernadero. El nuevo Gobierno de Gambia ya ha esclarecido en transcurrir hacia las energías renovables y seguir con su desarrollo bajo esta alternativa, dando a Gambia una mayor independencia del coste variable provocado por el mercado del diesel. Por último, es evidente que esta alternativa no seguiría el programa definido en el acuerdo de Paris ni transcurriría hacia el objetivo del 35% de producción desde energías renovables impuesta por el gobierno local, por lo que el diesel se sitúa como la última alternativa para la generación auxiliar en el proyecto. [15,57]

5.3 Vectores energéticos en la planta de la moringa

La generación de combustible in situ ha sido la alternativa que más atención ha acaparado para este proyecto. Gambia se encuentra en una transición mermada de energía, donde busca principalmente impulsar la seguridad de su abastecimiento. La biomasa, a diferencia del diesel, permite en este caso ser producida en el mismo huerto, lo que permite llevar un control exhaustivo del combustible. Previamente se ha introducido la fuente energética que los distintos materiales provenientes del árbol de *Moringa oleifera* pueden llegar a significar, lo cual coincide con las buenas condiciones locales para apostar por analizar la viabilidad de esta alternativa vegetal.

Enlazar la generación solar fotovoltaica con la generación auxiliar vegetal ofrece la posibilidad de recrear un sistema híbrido autosostenible en el recinto, el cual ofrece la

capacidad de crear un sistema de generación eléctrica que varíe en función de la producción vegetal local. Es decir, el incremento previsto de huertos de moringa y abastecido por sistemas de generación similares al que se plantea en este proyecto, puede significar el origen de una fuente proporcional de combustible provechoso.

Para la interpretación de esta alternativa es necesario un análisis de los recursos y el ritmo de producción, para determinar así la viabilidad de la misma para el caso del huerto escuela. La distribución del cultivo, orientado a maximizar la producción de aceite, cuenta con el propósito de distribuir las hojas y el aceite como producto. A pesar de ello, con el fin de fomentar un ámbito aún desconocido y lograr una visión global de la capacidad energética de la planta, se han estudiado diferentes posibilidades que pueden aprovecharse en otras condiciones.

Además de lo descrito hasta el momento, otro de los apartados interesantes por analizar en este proyecto ha significado el análisis de funcionamiento de un sistema real que cumpla con las características que propone este recurso vegetal. Teniendo en cuenta las tecnologías descritas, se van a poder desempeñar diferentes escenarios interesantes en función de los intereses locales.

6 DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS

En este apartado, se resume toda serie de cálculos que han sido necesarios para la ejecución del presente proyecto. A grandes rasgos, se han tenido en cuenta los consumos a realizar en el tratamiento de la moringa y labores indirectas, que deben de ser abastecidos con un sistema de generación lo más eficiente y realista posible. Para ello, se describen bajo diferentes apartados las estimaciones que han sido necesarias para llevar a cabo este proyecto.

6.1 Condiciones del entorno y su consecuente crecimiento vegetal

La ejecución de este proyecto es precisamente por el deseo de obtener una incesable producción de moringa y la utilización de esta con la finalidad de lograr productos interesantes para las diferentes actividades humanas. Para ello, ya se ha hecho una breve introducción del tipo de equipamiento que hace falta acoplar al sistema de generación y permitir así la labor en la zona de cultivo.

En función de la finalidad escogida para la plantación de moringa, se ha mencionado que establecen diferentes tratamientos del cultivo y una diferente distribución de las plantas en el terreno. Muchos trabajos de investigación a escala más pequeña se permiten una gran densidad de plantas moringa, con unas distancias entre plantas que pueden ir desde unos pocos centímetros hasta el metro. En producciones más grandes, donde el objetivo es obtener un cultivo más duradero y estable, se amplían las distancias entre plantas hasta un rango de 2-5 metros.

La moringa logra germinar indistintamente de la época del año en el que se encuentre, pero sí que encuentra alteraciones en función del clima a lo largo del año. La temperatura, el suelo y la pluviometría son, entre otros, los factores que determinan el crecimiento de biomasa del árbol y, por tanto, variables sobre el ritmo de producción.

Tabla 6.1.- Datos meteorológicos en Kolda, cerca de Muritabeh. [58]

	Temperatura media (°C)	Humedad (%)	Precipitación (mm)
Enero	25	39	0,1
Febrero	28	36	0,1
Marzo	30	40	0,6
Abril	32	46	0
Mayo	33	52	25,9
Junio	31	65	127,6
Julio	29	78	240,8
Agosto	28	84	320,4
Septiembre	28	82	239,6
Octubre	29	76	45,2
Noviembre	27	64	0,1
Diciembre	25	50	0,5

La *Moringa oleifera* se encuentra extendida a lo largo del globo terráqueo, de manera más abundante en los países con climas tropicales, seguidos por países con climas subtropicales. Debido a la falta de documentación acerca de la producción de moringa con establecimiento en Gambia, se han utilizado datos de otros territorios que cuenten con climatología similar. Tras el análisis, se ha observado que zonas como Nicaragua y Honduras cuentan con unas condiciones climatológicas similares a las de Gambia, por lo que se ha procedido a la utilización de estas fuentes para los cálculos correspondientes al crecimiento del cultivo. [59,60]

A pesar de poder llegar a valores de densidad de unas 1000000 plantas/ha [28,61] cuando el producto principal es la biomasa, la producción de semillas necesita mayor separación entre árbol y árbol, dentro de un rango de cultivo de 300 a 1200 plantas por hectárea. Dado que tanto la producción de semillas como la de biomasa son de interés en este proyecto, se escoge un rango de cultivo de 1000 plantas/ha, lo que ofrece un valor de 250 plantas de moringa en la superficie que ocupa el huerto escuela. [60]

Este valor de densidad se ve gratificado además por una mayor producción de biomasa fresca por planta, que aproximadamente llegaría a un valor anual de 4kg de hojas frescas por árbol de moringa. Un valor total de una tonelada de biomasa anual en el huerto escuela.

La producción de esta biomasa se da a lo largo de todos los meses del año, no obstante, no cuenta con un mismo ratio mensual, lo que supone un consumo cíclico que tendrá que ser corregido mediante una optimización de los generadores principal y auxiliares.

La mayor producción de moringa se realiza en la época de verano, donde las lluvias abundan y se alcanzan unos valores del 11.10%, 13.70%, 15.12% y 16.61% respecto a la producción anual total entre los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto, respectivamente. Esto comprende un 56.53% de la producción total anual respecto al 43.47% restante para los ocho meses que completan el año. [22]

Verano: $56.53\% \cdot 4\text{kg/planta} \cdot 250\text{plantas} = 565.30\text{kg}$ de Biomasa en 4 meses.

Resto del año: $43.47\% \cdot 4\text{kg/planta} \cdot 250\text{plantas} = 434.70\text{kg}$ de Biomasa.
(54.34kg/mes)

Estos valores caracterizan el reto al que se enfrenta el proyecto de generación eléctrica, donde la mayor demanda se produce en verano, con un pico de 166 kilogramos de biomasa producidas en el mes de Agosto.

Además de las hojas, hay que mencionar la importante producción de vainas repletas de semillas, que surgen desde las flores que aparecen en el periodo tras las lluvias. Precisamente los meses de Abril-Mayo señalan la época en la que las vainas se encuentran suficientemente maduras para ser recolectadas. Esto, suponiendo un valor medio de producción de 1000-1600 semillas por árbol cada año [25], da un total de 325000 semillas (aprox. 97.50kg) en un año en el huerto escuela. [60]

$$325000 \text{ semillas} \cdot \frac{0.3\text{g}}{1 \text{ semilla}} \cdot \frac{0.725\text{g kernel}}{\text{g semilla}} \cdot \frac{36.7\text{g aceite}}{100\text{g kernel}} \cdot \frac{1\text{ton}}{10^6\text{g}} = 25.94\text{kg de aceite}$$

Es decir, que cada año, se producirá un total de semillas equivalentes a 25.94kg de aceite a extraer desde su interior [26]. Hay que recordar que su recolecta se concentra en unos pocos meses, por lo que sus reservas habrá que gestionarlas en función de esa producción centralizada en esos meses.

Estos productos generados son por tanto los que determinan parte de los equipos que deben de ser conectados al sistema de generación eléctrica. En el siguiente punto se

explican los equipos y su ritmo de funcionamiento, para estimar la demanda eléctrica que supone el cuidado del huerto.

6.2 Cálculo de consumo en el huerto escuela

Tal como se ha explicado previamente, con el fin de capacitar el huerto escuela con una correcta generación, se presentan los cálculos de consumo esperados para llevar a cabo las acciones u operaciones para el tratamiento de la moringa.

La selección del equipamiento utilizado en el proyecto se ve afectado por el origen del que provienen, sobretodo a la hora de hablar de lugares subdesarrollados como es el caso de Gambia. No obstante, este efecto se ve en mayor medida en el precio de los equipos y, a pesar de que el equipamiento se va a obtener desde proveedores locales, los valores de energía consumida por estos equipos se han podido extrapolar desde equipos de otros mercados internacionales. De hecho, lo que se ha estudiado en el presente proyecto ha sido el consumo realizado por estos equipos y no su coste, por lo que la elección real de los equipos se ha atribuido al propio huerto escuela.

A continuación, se clasifican los procesos llevados a cabo para el tratamiento adecuado del huerto escuela.

6.2.1 Bombeo de agua

A modo de unir toda la demanda eléctrica en uno, se va a tener en cuenta la energía que se necesita para el bombeo de agua. Un servicio destinado principalmente al consumo humano, dado que la moringa no demanda un gran regadío por su capacidad de crecer en condiciones secas. Los datos extraídos muestran que el acuífero cuenta con unas buenas características para un apropiado bombeo de la misma:

Nivel freático: 22 metros

Caudal: 4m³/s

Con estas características, el efecto sobre el medio no resulta ser importante. Se estima una extracción cada dos días de 1m³ en una sola hora, para llenar de esta manera unos tanques en la superficie y no tener problemas por falta de agua. Además, aprovechando principalmente la energía solar, hay margen para aumentar el volumen de agua extraída.

Para todo ello, ya se encuentra instalada una bomba hidráulica Grundfos de 400W de potencia y un consumo generado especificado en la Tabla 6.2.

6.2.2 Pre-secado

Una vez separadas las hojas de las ramas, lo habitual es aplicar una etapa de secado previo a la molienda que aplique una deshidratación adecuada sobre la biomasa de moringa disponible y facilitar así su manipulación en etapas posteriores [24,62]. El flujo másico de biomasa a preparar y conservar en el huerto escuela ya se ha explicado que viene muy definido por la época del año, con un máximo a lo largo del periodo de lluvias en verano. Se ha utilizado por tanto, a modo de referencia, la producción de moringa de 166 kilogramos a lo largo del mes de Agosto, calculado en el apartado anterior, y estimar así la capacidad mínima de deshidratación que necesita el emplazamiento, con su consiguiente consumo eléctrico.

La capacidad de secado tiene que ser por tanto la suficiente como para afrontar dicha producción de moringa. La bibliografía muestra diferentes condiciones de secado, aunque temperaturas superiores a los 60°C pueden producir pérdidas importantes de las propiedades de la moringa, por lo que se recomienda trabajar a 50°C con un tiempo de deshidratación de 24h, la cual se considera suficiente para llegar a un valor suficientemente constante de humedad residual. [24,54,62]

El horno utilizado a modo de ejemplo para el cálculo del consumo ha sido el horno ThermoFischer OMS180. Puede considerarse bastante moderna, pero teniendo en cuenta la gran información que ofrece y que puede plantearse la prescindencia del secado artificial por un tiempo, ha sido seleccionado para llevar a cabo los cálculos en el proyecto. Este horno permite una capacidad de 50kg, la cual se espera aprovechar al máximo para minimizar así la cantidad de días y, prevenir así, la descomposición del producto. Este horno tiene una potencia máxima de 3060W que puede observarse en los primeros momentos de encendido del horno, valor que se reduce de manera considerable hasta los 465W una vez ha encontrado la temperatura de trabajo.

Hay que recordar que en el interior del horno la deshidratación hasta un valor máximo de humedad residual del 15% de la moringa provoca una disminución considerable de su masa, lo cual facilitará su tratamiento en las etapas posteriores. Estimando que la humedad relativa

máxima a la salida del horno se establece en ese 15%, se calcula la masa tras su deshidratación, que debe de ser tratada en la etapa de molienda posterior.

En ese mes de Agosto,

$$166\text{kg materia húmeda/mes} \cdot \left(\frac{28.5\text{kg materia seca}}{100\text{kg materia húmeda}} + \frac{15\text{kg humedad residual}}{100\text{kg materia húmeda}} \right) = 72.24\text{kg/mes}$$

Si se analiza respecto a la producción de hojas de moringa anual,

$$1000\text{kg materia húmeda/año} \cdot \left(\frac{28.5\text{kg materia seca}}{100\text{kg materia húmeda}} + \frac{15\text{kg humedad residual}}{100\text{kg materia húmeda}} \right) = 435\text{kg materia seca/año}$$

6.2.3 Trituradora

Una vez adecuadas las condiciones de la moringa, es más fácil su molienda en unos rangos más bajos de humedad. Con una potencia de 4kW y una capacidad de tratamiento de 60-150kg/h, los modelos BrightSail BSC-200 y Pasen PSF-20 han sido los ejemplos utilizados para el cálculo de consumo en el proceso de molienda. Valores que se resumen en la Tabla 6.2.

6.2.4 Secado definitivo y almacenamiento

Un tratamiento adecuado del producto significa un valor final máximo de humedad residual del 15% del producto, llegando incluso a valores del 6%-12% [24,62]. Tras la primera etapa de deshidratación, el producto vegetal ha podido absorber humedad, por lo que se aplican 4 horas de secado para obtener el producto final bajo buenas condiciones. Para ello se utiliza una temperatura de 50°C en el horno y se guarda posteriormente el producto en un lugar seco.

6.2.5 Extracción de aceite

Los frutos producidos tras los primeros meses requieren su correspondiente tratamiento. Una separación desde la vaina y un descascarillado manual que viene seguido de una etapa de extracción del aceite desde los núcleos de la semilla. A diferencia de las hojas de moringa, las semillas cuentan con una menor humedad, que puede aproximarse a un valor del 3-7% [28,63], aunque también sufre una gran dependencia sobre el clima, pudiendo

llegar incluso al 45% [64]. Hay que tener en cuenta esa fluctuación de humedad, pero no se ha visto necesario la incorporación de más equipos mecánicos, en caso de ser necesario, se puede utilizar tanto el horno de deshidratación como el calor natural.

Las semillas son por tanto aprovechadas para la producción de aceite Behen, para ello, el prensado frío se ha seleccionado como la opción más adecuada, gracias a su conservación de la calidad del aceite producido, aunque con una eficiencia del 69% de aceite extraído [26,65]. Su recolecta y procesamiento, tal y como se mencionaba en apartados anteriores, se da en los meses de Abril y Mayo.

$$70.69 \frac{\text{kg núcleo}}{\text{año}} \cdot \frac{36.70 \text{ g aceite}}{100 \text{ g núcleo}} \cdot \frac{69 \text{ gramos}}{100 \text{ gramos}} \cdot \frac{1 \text{ l aceite}}{0.91 \text{ kg aceite}} = 19.67 \frac{\text{l aceite}}{\text{año}}$$

Para este tratamiento de prensado frío se ha seleccionado la prensa Kern Kraft KK40 a modo de ejemplo, con una capacidad de producir 14 litros de aceite por hora con una potencia de trabajo de 3kW.

Además, gracias a su estabilidad oxidativa excepcional, el aceite de Behén no causa problemas para su conservación. [66]

6.2.6 *Procesado de combustible secundario y consumo local.*

Más adelante se explica el razonamiento para la selección de pellets de biomasa sólida como combustible para la generación auxiliar, pero llevar a cabo este propósito necesita de un sistema de procesado específico.

Esto significa el tratamiento de una gran cantidad de masa vegetal que necesita ser transformada a materias más densas para favorecer su combustión, por lo que se ha visto la necesidad de incorporar una máquina peletizadora al huerto. La peletizadora seleccionada a modo de ejemplo para estimar su consumo y modo de operación ha sido el modelo PLT-50, con un ritmo de producción de 15-30kg/h. Con una potencia de 2800W, esta máquina puede significar la respuesta a cualquier desajuste que pudiera ocurrir en la generación principal, con la posibilidad de incorporar glicerol para favorecer la compactación de la materia.

Tabla 6.2.- Equipos de tratamiento de moringa y sus respectivas características.

Proceso	Presecado	Molienda	Secado def.	Prensa	Bombeo	Luz y hogar	Peletizadora	
Modelo	OMS180	PSF-20	OMS180	KK40	Grundfos	[67]	PLT 50	
Cant.	1x	1x	1x	1x	1x		1x	
Potencia (W)	3060	4000	3060	3000	400	500	2800	
Factor	0,15		0,15					
Capacidad (kg)	50		50					
Masa (kg)	1000	435	435	71	182000		993	
Tiempo por tanda (h)	24		4					
Ritmo (kg/h)		115		40	1000		15	
Tandas	20		9					
Trabajo (h)	480	4	36	2	182		66	
								Total (kWh)
Consumo (kWh)	275	15	39	5	73	500	185	1092

De esta manera, se puede estimar el consumo mínimo que va a significar la incorporación de estos equipos al lugar. Un consumo que después se ve incrementado por la producción irregular de los productos de moringa, principalmente por la recolecta mensual de hojas. A pesar de ello, estos datos ayudan a distinguir los procesos más diferenciados en cuanto a su consumo, como es el caso del presecado, donde se debe tratar una gran cantidad de masa vegetal y la producción de pellets, que es precisamente lo que permite dar a este proyecto una continuidad y seguridad de generación eléctrica a lo largo del año. En otras palabras, puede referirse a este proceso como una transformación de energía solar a pellets, que puedan permitir así un almacenamiento del combustible. Además de ello, se ha querido aprovechar la generación eléctrica para alimentar una casa instalada en el emplazamiento y favorecer así la calidad de vida de la familia residente. Por otro lado, se encuentran los procesos que, debido a sus cortos tiempos de trabajo, significan el menor de los consumos, como es el caso de la molienda y el prensado, donde se permite observar una mayor capacidad para el tratamiento de biomasa. No obstante, la recolecta de materia a tratar desde otros huertos podría significar un incremento de eficiencia y consumo en este aspecto.

6.3 Condiciones del sistema solar fotovoltaico

En el siguiente apartado se presentan los datos acerca de las condiciones de energía solar para afrontar el consumo calculado previamente en el huerto escuela de Muritabeh, tanto el mantenimiento de la moringa como los procesos de preparación posteriores.

Para ello, se han analizado las tres alternativas presentadas previamente y se ha seleccionado la más favorable para demostrar posteriormente la viabilidad de un proyecto solar en el pueblo Muritabeh mediante datos solares.

Las alternativas consistían en una posición horizontal, optimizar un ángulo fijo de los módulos e investigar la posibilidad de incorporar un sistema de seguimiento en el generador solar. Analizando las tres posibilidades, se muestran en la Tabla 6.3 los datos facilitados por PV-GIS, el cual facilita un ángulo óptimo de $\beta=16^\circ$ para esas coordenadas, y que se utiliza para su análisis. En la siguiente tabla, se observa la irradiación global diaria media que se detecta para cada uno de los casos.

Tabla 6.3.- Irradiación global diaria media para las distintas alternativas. (PV-GIS)

	$G_{dm} (0)$ (W·h·m ⁻²)	$G_{dm} (\beta)$ (W·h·m ⁻²)	$G_{dm} (seg.)$ (W·h·m ⁻²)
Enero	5723	6653	8808
Febrero	6438	7117	9230
Marzo	7098	7365	9499
Abril	7483	7270	9762
Mayo	7081	6561	9011
Junio	6536	5967	8102
Julio	5881	5457	7136
Agosto	5469	5256	6536
Septiembre	5711	5756	7058
Octubre	5921	6345	7880
Noviembre	5666	6468	8411
Diciembre	5432	6417	8583

Precisamente la opción de instalar un sistema de seguimiento solar ofrece, lógicamente, los mejores resultados en cuanto a generación energética. No obstante, la tecnología de seguimiento, de dos ejes en este caso, aún se encuentra bajo desarrollo tecnológico. Esta

alternativa necesita, de momento, de una superficie mayor para su instalación, debido a la necesidad de incorporar mayor equipamiento que permitan el sistema de movimiento de los paneles. Además, cuenta aún con una inversión inicial y tiempo de amortización mayores que en el caso de paneles fijos, especialmente en territorios con menor competencia en energía solar [68]. Por lo tanto, no se ha seleccionado como la alternativa a desarrollar en el presente proyecto, donde se espera un sistema de menor potencia eléctrica. Sin embargo, los resultados son muy interesantes para poder comparar así con las demás alternativas y poder conocer cual sería el techo en el caso de querer aplicar un proyecto de mejora.

Por otro lado, se han analizado los resultados de irradiación en el plano horizontal y bajo el ángulo óptimo de 16° previamente mencionado. Este ángulo muestra la elevación que habría que aplicar sobre el grupo de módulos para lograr la máxima irradiación anual por metro cuadrado, y que, tal como puede observarse en la Tabla 6.3, supera los valores de la irradiación en el plano horizontal.

Tal como muestran los datos, y como es lógico debido al trayecto que sigue el sol en los diferentes periodos del año, la elevación de los módulos solares se ve mayormente favorecida cuando el sol alcanza alturas menores, es decir, en la época de invierno. En la época de verano, en cambio, ofrece valores inferiores, sumado además a que esta elevación provocaría unas horas de sol al mediodía que dificultaría la irradiación directa. La planificación en el huerto escuela muestra una demanda eléctrica que tiene que abastecerse de manera estable y, aunque ambas opciones ofrecen valores de irradiación bastante constantes, el plano horizontal ofrece una mayor estabilidad. Además, tal como se describía en apartados anteriores, la mayor producción de moringa y por tanto, mayor crecimiento de cultivos en el huerto, es en la época de verano. Esto mismo muestra que existe una mayor cantidad de trabajo planificado para este periodo del año, que tiene que ser cubierto por una máxima generación de energía. Esto puede verse muy claro en los datos de plano horizontal, donde a partir del mes de Abril, se dan unos muy buenos valores de irradiación, superando los valores obtenidos con una elevación del plano.

Estos mismos resultados muestran valores anuales de irradiación sobre el plano horizontal de $G(0) = 2262.90 \text{ kWh/m}^2$, estando muy cerca de la media nacional.

Pero no todo es la irradiación global, y es que las diferentes fracciones que componen este valor (Irradiación directa (B_{dm}), reflejada (R_{dm}) y difusa (D_{dm}) diaria media), se ven muy afectadas por diferentes condiciones como el clima. Estos valores de irradiación se resumen en la siguiente Tabla 6.4.

Tabla 6.4.- Datos de irradiación diaria media sobre el plano horizontal. (PV-GIS)

	G_{dm} (0) (W·h·m ⁻²)	B_{dm} (0) (W·h·m ⁻²)	D_{dm} (0) (W·h·m ⁻²)
Enero	5723	3944	1779
Febrero	6438	4531	1907
Marzo	7098	5018	2080
Abril	7483	5406	2077
Mayo	7081	4786	2295
Junio	6536	4002	2534
Julio	5881	3204	2677
Agosto	5469	2785	2684
Septiembre	5711	3189	2522
Octubre	5921	3743	2178
Noviembre	5666	3888	1778
Diciembre	5432	3766	1667

Observando los datos, se puede ver un pico de irradiación referente a su fracción difusa entre los meses Julio, Agosto y Septiembre, que, corresponden a los meses más lluviosos del año, en consecuencia al fenómeno del cinturón de lluvias tropicales. Se detecta por tanto la aminoración que va a haber en la época de verano, compensado mediante la colocación horizontal previamente descrita.

6.4 Análisis del abastecimiento solar e intervención del almacenamiento en baterías

Una vez analizadas las condiciones solares de la localización, se procede a estudiar los elementos que componen un sistema solar fotovoltaico y lograr abastecer de manera adecuada los procesos que componen el trabajo realizado en el huerto escuela. Para ello, lo primero ha sido realizar un pequeño calendario que encaja con el posible ritmo de trabajo que pueda desarrollarse en el huerto, para obtener así valores de demanda de electricidad que puedan ser abastecidos principalmente por el sistema de generación solar.

Tabla 6.5.- Calendario de entrada en funcionamiento (verde) de cada equipo.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Presecado												
Molienda												
Secado def.												
Prensado												
Bombeo												
Hogar												
Peletizadora												

Mediante esta distribución, el consumo anual se ve incrementado hasta un valor de 1262.59kWh, causado principalmente por la exigencia de no poder utilizar siempre los equipos a plena carga. Para estos procesos además, se ha dado la preferencia a las etapas de secado y poder así impedir la descomposición de los productos.

Se ha analizado una potencia referencial de 4kW para la instalación solar inspirado en otros proyectos realizados por M'bolo Association y en el rango de potencias de funcionamiento del equipamiento seleccionado. Siguiendo las alternativas descritas previamente, se ha considerado la incorporación de baterías acopladas al sistema fotovoltaico, un escenario con almacenamiento en batería de 4kWh, siguiendo las relaciones de 1kWh/kW utilizados en otros proyectos solares, y dos escenarios con valores de almacenamiento inferiores de 1kWh y 2kWh, destinados a posibles entornos de menor exigencia de capacidad de almacenamiento. El límite de descarga aplicado a las baterías de la simulación se ha situado en un 40%. Asimismo, también se ha analizado un caso más modesto de 3.5kW de potencia fotovoltaica y ver así los efectos que éste pueda surtir.

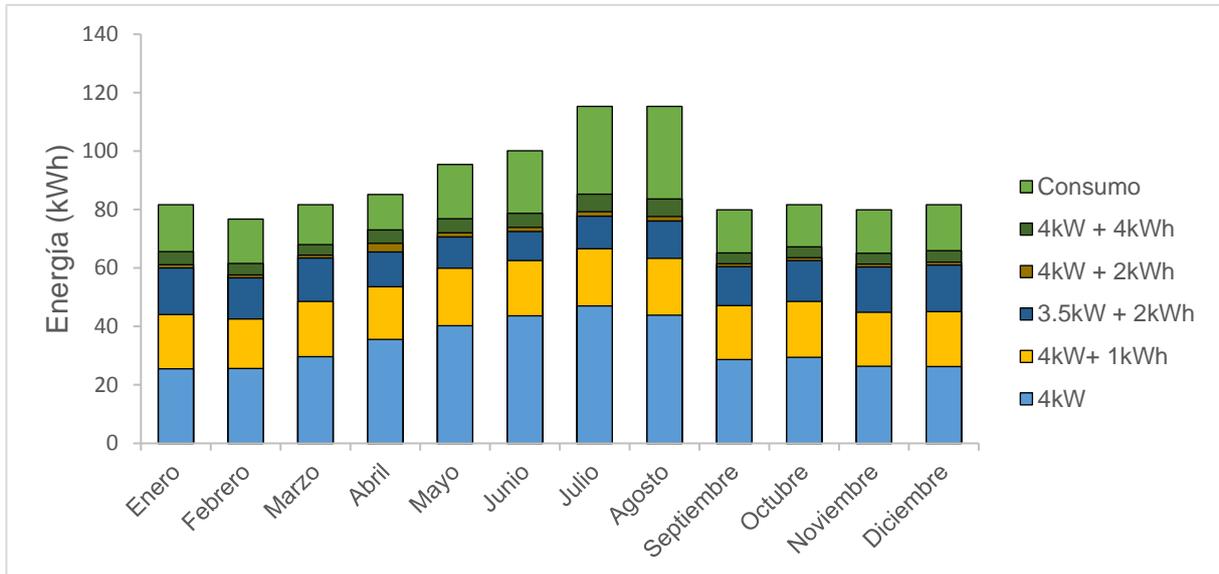


Ilustración 6.1.- Abastecimiento solar fotovoltaico respecto al consumo anual, sin producción de pellets.(PV-GIS)

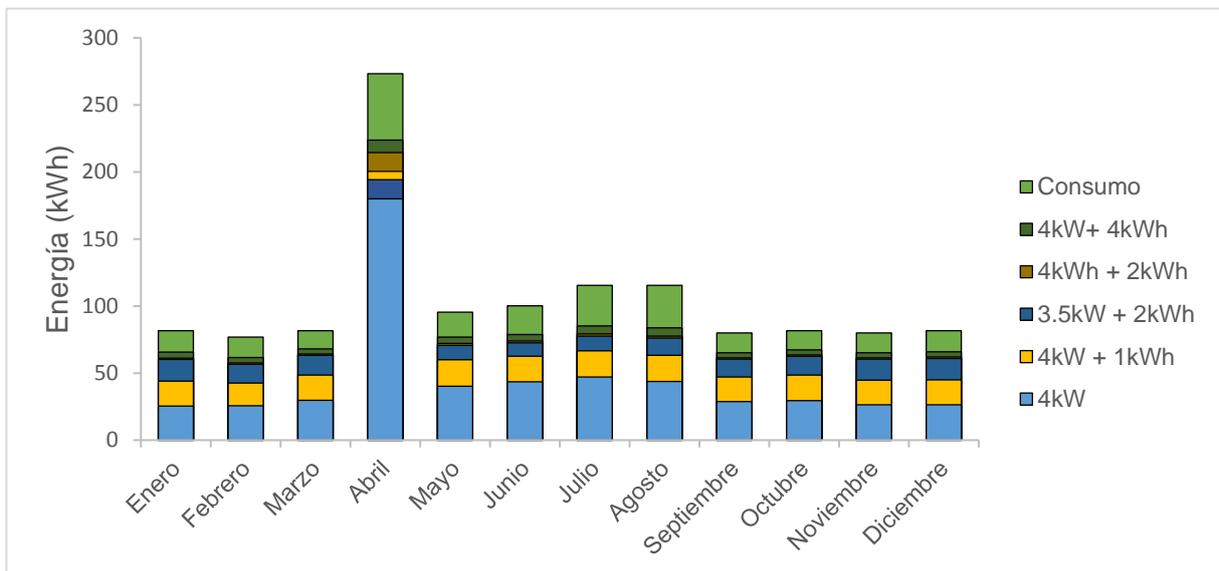


Ilustración 6.2.- Abastecimiento solar fotovoltaico respecto al consumo anual, con producción de pellets.(PV-GIS)

En primer lugar, se observa una diferencia notoria entre las dos ilustraciones, dado que la producción de pellets llega a incrementar en un 17.50% el consumo eléctrico anual. Esta acción además genera un cambio sustancial provocado por la capacidad instalada, tal como puede verse en el caso de menor potencia (3.5kW) que se ve limitado durante el mes de mayor consumo del año, consumo que tampoco consiguen abastecer las instalaciones de mayor potencia.

No obstante, el comportamiento el resto de meses del año puede observarse bien en la Ilustración 6.1. En primer lugar, puede observarse que en ningún escenario el consumo mensual llega a abastecerse. Principalmente, esto se debe a que, además del consumo provocado por el hogar, el proceso de deshidratación primario necesita de un funcionamiento nocturno. Para este abastecimiento únicamente mediante generación solar, el sistema debería de contar especialmente con una capacidad de baterías superior a los escenarios que se han planteado. Esto, sumado a la insuficiencia solar por otras razones, generan un déficit de energía que debe solucionarse. Una vez dicho esto, se procede a analizar los efectos producidos por las diferencias de características impuestas en los diferentes escenarios expuestos en la Ilustración 6.2.

A la hora de examinar este escenario, por un lado, puede verse la gran importancia de la generación auxiliar aplicada en este caso mediante baterías, dado que la alimentación única y exclusiva de placas solares apenas logra alcanzar un 31% del consumo total durante los meses con menos horas de sol, con una aportación de hasta el 66% y 43.5% en los meses de abril y junio, respectivamente. En este caso, la adición de un sistema de generación auxiliar muestra una mejoría considerable en los datos de abastecimiento del entorno. Únicamente la adición de 1kWh de capacidad en batería significa un incremento de entre el 41-73% en la generación eléctrica, a excepción de abril con un incremento del 11%. Estos incrementos pueden observarse a medida que la capacidad de la batería va incrementándose, lo que refuerza aún más la necesidad de incorporar una generación auxiliar en el tratamiento de moringa y subproductos que se ha elaborado para este proyecto. Por otro lado, tal como se ha descrito previamente, el escenario de menor capacidad de generación solar (3.5kW) consigue abastecer de manera eficaz en los meses de consumo menor, no obstante, el incremento a valores de consumo superiores, como ocurre en el mes de abril, limita en gran medida el procesamiento del cultivo y producción de

pellets. Esto, además de lo explicado antes, condiciona la posibilidad de aumentar el procesado o la incorporación de nuevos equipos para asistir a las labores locales.

Hay que mencionar que los sistemas seleccionados apenas logran igualar las potencias demandadas por los equipos seleccionados. No obstante, se ha seleccionado esta forma de trabajar debido a que los equipos de mayor potencia trabajan por un tiempo reducido y se ha pensado en una forma sucesiva de trabajar, donde no se superpongan varios equipos a la vez, por lo que se muestran como escenarios adecuados para la intervención de la generación auxiliar para paliar la situación. De esta manera, se ha concluido la necesidad de incorporar una potencia mínima de 4kW fotovoltaicos para afrontar los consumos de los equipos previamente detallados, pero con una generación auxiliar necesaria. La incorporación de baterías, por otro lado, ha demostrado gran utilidad para un mayor aprovechamiento solar.

6.5 Capacidad energética de biomasa local como combustible

Enlazando con lo expuesto previamente, cabe contemplar la complementación de la generación solar con un sistema que trate de aprovechar la fracción no utilizada del árbol como recurso de generación energética. Para ello, en este apartado se procede a analizar la viabilidad de los recursos vegetales provenientes de la moringa para su aplicación como combustible de generación auxiliar.

Tal como se explicaba en la parte inicial del trabajo, este milagroso árbol ofrece una gran diversidad de productos que pueden transformarse en fuentes bioenergéticas. Biodiesel, biogás o bioetanol son varios de los productos derivados de la moringa mediante sus respectivos procesos, aunque también es posible utilizar sus diferentes partes directamente como recursos sólidos energéticos. Las alternativas posibles a día de hoy se muestran en la Tabla 6.6, existiendo aún margen para el desarrollo de nuevas variantes.

Tabla 6.6.- Recursos transformables en biocombustibles.

Derivado de la moringa	FRUTO				HOJAS		
	Semillas		Aceite	Cascarilla			Vaina
Producción anual (kg/año)	97,50		17,90	312,08	680,48	1000,00	
Combustible	Semillas	Torta de prensado	Biodiesel	Pellets de biomasa		Biogás*	Bioetanol*

* No se han estudiado como alternativa en este proyecto.

Dentro de la producción vegetal, puede llegar a sorprender la gran masa correspondiente a los frutos de moringa, pero hay que recordar que la distribución del cultivo se ha preparado precisamente para favorecer una gran producción de semillas, que se concentra en una única recogida en todo el año.

A la hora de analizar el poder calorífico de cada uno de los combustibles y poder así estimar su capacidad de generación energética, algunas de las alternativas se han encontrado obstruidas por la escasez de documentación al respecto y la imposibilidad de realizar análisis de calorimetría de manera personal. No obstante, la correlación desarrollada por Channiwala y Parikh (2002) ha permitido, mediante los análisis elementales resumidos en el

Anexo V, estimar los valores de poder calorífico de los combustibles que no cuentan aún con información al respecto, utilizando las ecuaciones (2.1) y (2.2). Los valores de los combustibles analizados se resumen en la Tabla 6.7., la cual se ha complementado con resultados desde experimentos realizados por diferentes autores.

Tabla 6.7.- Propiedades energéticas de los biocombustibles para la generación auxiliar.

	Producción (kg/año)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	Capacidad energética (MJ/año)
Biodiesel	17,03	39,94 ^b	37,53 ^b	639,18
Pellets de hojas	435,00	20,64 ^c	19,40 ^c	8439,00
Semillas	97,50	22,93 ^b	21,14 ^b	2061,15
Torta de prensado	52,79	19,05-24,81 ^{a,c}	17,36-23,31 ^{a,c}	1046,09
Pellets de cáscarillas	312,08	18,52-21,98 ^{b,d}	15,87-20,35 ^{b,d}	5652,54
Pellets de cáscaras	680,48	18,77 ^a	16,96 ^a	11542,21

^aCálculos propios; ^bGomes Pereira, et al. (2015); ^cGodino, et al. (2013); ^dPfeil, et al. (2020)

Tal como se observa en la Tabla 6.7, todos y cada uno de los combustibles viables consisten en una importante fuente de energía, aunque el procedimiento para obtener cada uno de ellos es diferente.

El recurso que lidera la tabla en valores caloríficos es el biodiesel. Este producto líquido necesita de un proceso de transformación bastante complejo y necesitaría por tanto un sistema particular para una reducida producción. Además, el aceite ya cuenta con una finalidad, por lo que entraría en conflicto de intereses. Como consecuencia, dicho sistema de elaboración no ha recabado como la solución a la generación energética auxiliar que se busca mediante este proyecto. No obstante, hay que señalar su gran proyección como posible solución a la demanda energética nacional. La educación y profesionalización de los habitantes locales sobre el cultivo de moringa y un incremento de producción de semillas pueden significar motivos suficientes para llevar a cabo un proyecto de producción de biodiesel a mayor escala.

Junto al biodiesel, hay que mencionar a las semillas de la moringa, que son la fuente del que proviene el aceite previamente explicado. En este caso las semillas no necesitan de un tratamiento, excepto un secado en caso de excesiva humedad, para su utilización directa como combustible sólido. Del mismo modo que ocurre con el biodiesel, las semillas son necesarias para la extracción del aceite, por lo que no es del interés de este proyecto su utilización a modo de combustible. No obstante, el proceso de prensado de las semillas produce una torta que si bien puede tener otras aplicaciones, también existe la posibilidad de utilizar esa biomasa a modo de combustible para la generación auxiliar.

Previo a desarrollar los combustibles seleccionados, hay que mencionar en último lugar la utilización de las hojas de moringa. Muchas son las aplicaciones de este producto debido a las grandes propiedades con las que cuenta, tal como se mostraba en la Tabla 2.2. Esto supone que a pesar de consistir en una producción continua a lo largo del año, cuenta con una disponibilidad limitada e irregular. La peletización de esta biomasa es suficiente para su aplicación como combustible, sin embargo, teniendo en cuenta que la generación auxiliar debe de solventar las irregularidades de la fuente de generación principal, la alternativa de las hojas de moringa no se ha llevado a cabo en el presente proyecto.

Llegado a este punto, en la Tabla 6.6 puede observarse que aún las cascarillas de las semillas y las vainas componen una gran fracción de los productos obtenidos, sumados a la fracción correspondiente a la torta de prensado. En total acumulan una fracción másica importante que no encuentra aún un aprovechamiento o funcionalidad real, a diferencia de las hojas y el aceite de moringa. Una materia de biomasa producida en el mismo procesamiento de la moringa y que, en favor de los intereses del presente proyecto se presentan como una interesante alternativa de generación energética. Así pues, toda esta materia es transformada a modo de pellet para favorecer su empleo y poder actuar en momentos de mayor demanda para una generación de electricidad.

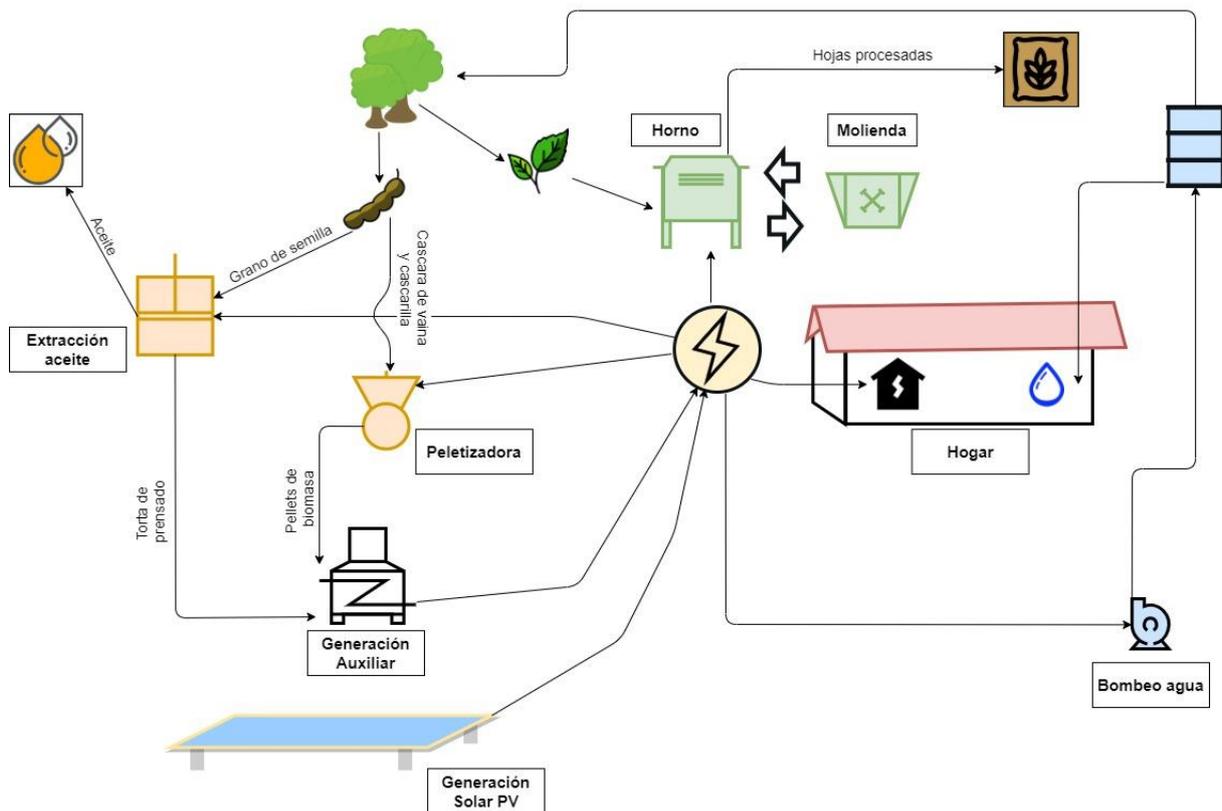


Ilustración 6.3.- Procesado de Moringa oleifera y fracción vegetal aprovechada.

6.6 Adaptación de la tecnología auxiliar

Una vez analizados los datos de consumo y su abastecimiento mediante la energía solar, en el apartado 5.2 se presentaban las diferentes alternativas viables para poder establecer una generación segura y estable. Los resultados mostrados en los anteriores apartados no han hecho más que reforzar la idea de una conveniente generación auxiliar, por lo que se procede a desarrollar la adaptación de los sistemas previamente explicados.

6.6.1 Generación con biomasa a baja temperatura

Anteriormente, en el apartado 2.11, se ha explicado la necesidad de desarrollar un sistema de generación conforme con las especificaciones que precisa un proyecto de estas características, con bajas potencias y consumos eléctricos. Por ello, a pesar de tratarse de un recurso sin interés local, ha de emplearse dicha biomasa de manera sensata y, poder así, optimizar el combustible vegetal producido desde el cultivo.

Dicho esto, el modo de empleo de este combustible es la de desarrollar un sistema ORC que permita generar electricidad a menor escala y lograr así, dimensionar el sistema de generación a las necesidades producidas y mostradas en el huerto escuela. Para ello, este trabajo se ha apoyado en otros proyectos híbridos a pequeña escala que muestran la eficiencia de los ciclos ORC. Para cumplir con la labor de sustentar los momentos de poca generación de manera eficiente, uno de los atributos más importantes es la selección del fluido de trabajo en el circuito ORC. Existen infinidad de alternativas, aunque el interés sobre un rango bajo de trabajo ha derivado en proponer un fluido que no necesite grandes aportaciones de calor, reduciendo el abanico de posibilidades. Para ello, la primera de las decisiones es seleccionar las condiciones de trabajo que determinen un fluido que case de mejor manera con ellas.

Una vez analizadas las características a cumplimentar en el proyecto, la mejor de las opciones se encuentra en una tecnología de generación ORC de baja temperatura, que permita aprovechar la biomasa disponible de manera distribuida. Para ser más precisos, se aplican bajas condiciones de trabajo para obtener una potencia eléctrica de salida de ORC reducida, una potencia máxima no mayor de 10kWe y modificable gracias a la gran flexibilidad de trabajo que permite esta tecnología. Dicho esto, los trabajos bajo estas condiciones alcanzan un rendimiento medio del 10-13% para el ciclo ORC con regenerador [39,44]. No obstante, el consumo generado por los equipos auxiliares y las pérdidas en la transferencia desde el circuito de aceite acoplado representan un importante factor a tener en cuenta, por el que se pierde aproximadamente el 10% de la electricidad generada en su alimentación. Por otro lado, el fluido de trabajo más popular para las condiciones seleccionadas es el refrigerante R245fa, que cuenta, entre otras propiedades, con una baja relación de expansión de volumen y una baja presión y temperatura de saturación. Siguiendo esa misma línea, se decide trabajar bajo unas condiciones similares a las mostradas en el trabajo realizado por Calise, Capuzzo y Vanoli (2013), además de la condición de tratar de evitar el sobrecalentamiento del fluido previo a su expansión, logrando un punto cerca de la curva de vapor saturado, tal como se muestra en el punto 1 de la Ilustración 6.5.

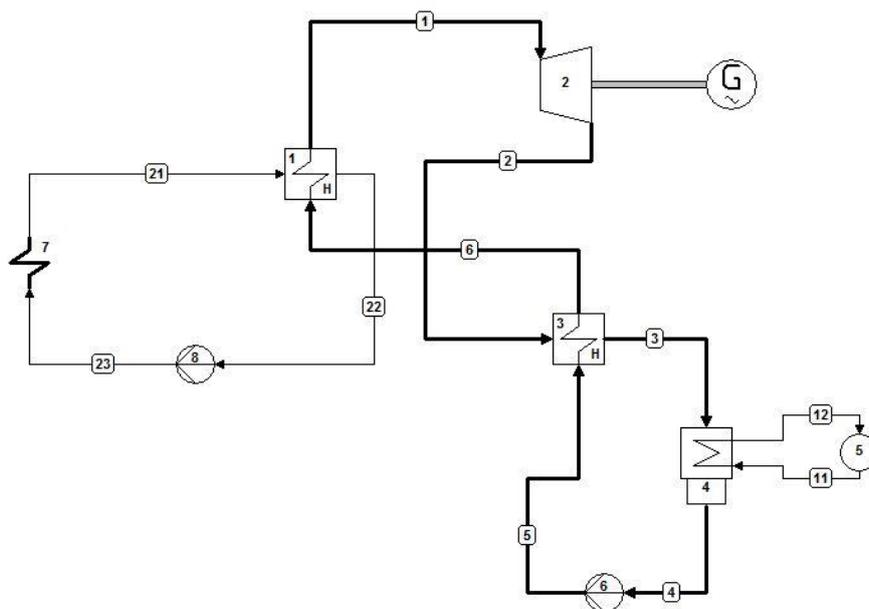


Ilustración 6.4.- Diagrama de proceso ORC de baja temperatura.

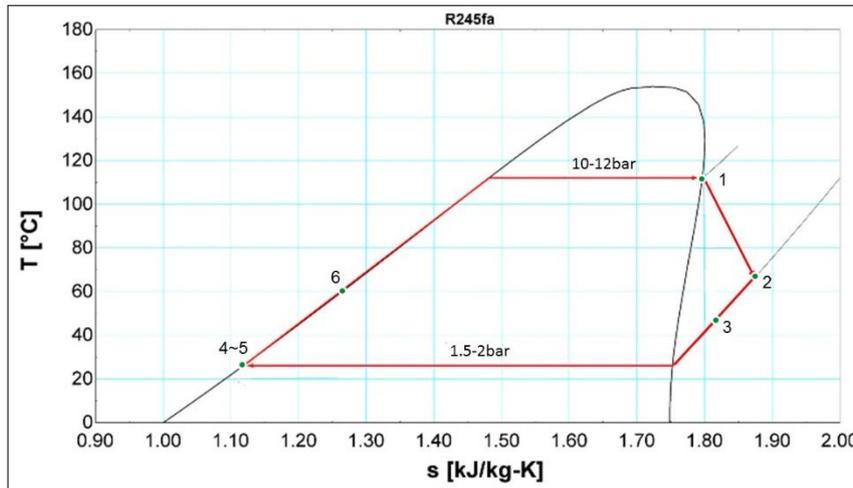


Ilustración 6.5.- Diagrama T-s del fluido de trabajo R245fa.

Una vez dicho esto, la generación eléctrica producible desde toda materia vegetal aprovechable y descrita anteriormente, acumula una capacidad eléctrica total de 524.42kWh que pueden aprovecharse en los momentos de mayor demanda para suplir de esta manera a la generación solar fotovoltaica.

$$18240.84 \frac{MJ}{\text{año}} \cdot \frac{0.2778 kWh}{1 MJ} \cdot \frac{11.5kWh, e}{100kWh, t} \cdot \frac{90kWh, neto}{100kWh, bruto} = 524.42kWh$$

6.6.2 Almacenamiento en baterías de litio

Hasta el momento, la intervención de baterías conectadas al generador fotovoltaico se ha pasado por alto, centrandó la atención a la generación desde los pellets. El aprovechamiento de estos desperdicios vegetales para la generación auxiliar permite, respecto a las baterías, almacenar la energía y poder distribuirla bajo las necesidades exigidas por el proceso con total libertad. No obstante, en los escenarios mostrados en la Ilustración 6.1 e Ilustración 6.2 ya se había observado que la incorporación de baterías de pequeña capacidad demuestran una gran funcionalidad.

En ellos se menciona precisamente el gran beneficio provocado por la incorporación de baterías, incremento mostrado principalmente en las baterías de menor capacidad hasta llegar a una mejora de menores dimensiones al llegar a los 4kWh. De acuerdo con lo explicado hasta ahora, la capacidad de batería óptima se muestra en los 2kWh, llegando a mejorar en un 114-140% el desempeño del sistema en los meses de otoño e invierno, mientras alcanzan un 68-93% en los meses de mayor demanda eléctrica, todo ello sin tener que incorporar una gran capacidad de almacenamiento. Para resaltar el buen comportamiento que ofrecen las baterías, se observa además que la variación de potencia para su análisis no muestra grandes cambios, cosa que si se observa con la incorporación de baterías. Por último, cabe destacar que la innecesariedad de la etapa de peletización significa una disminución del consumo local, valor de consumo que iría incrementando a mayor producción de moringa.

Una vez comentadas ambas tecnologías de generación auxiliar, en el siguiente apartado se realiza una recopilación de los resultados obtenidos y se han utilizado para concluir si la tecnología ORC cuenta con unas características suficientes para poder sustituir a las baterías de litio, alternativa más popularizada en la tecnología fotovoltaica.

6.7 Dimensionamiento del sistema definitivo

A modo de resumen, el cálculo inicial de consumo, con la integración de una máquina peletizadora, se estimaba entorno a un valor de 1092kWh eléctricos al año, valor que se vería incrementado, debido a la distribución de las labores locales, hasta un valor de 1263kWh como el consumo total finalmente. El sistema solar fotovoltaico concluido en el apartado 6.4, dado que el escenario de menor potencia mostraba insuficiencias en momentos de mayor demanda y máquinas de gran potencia, consistía en una potencia mínima de 4kW para el sistema fotovoltaico. Se logra mediante este sistema una generación solar de 546kWh al año, cuantía que no alcanza para un completo abastecimiento del sistema de explotación y promueve por tanto la incorporación de un sistema de generación auxiliar.

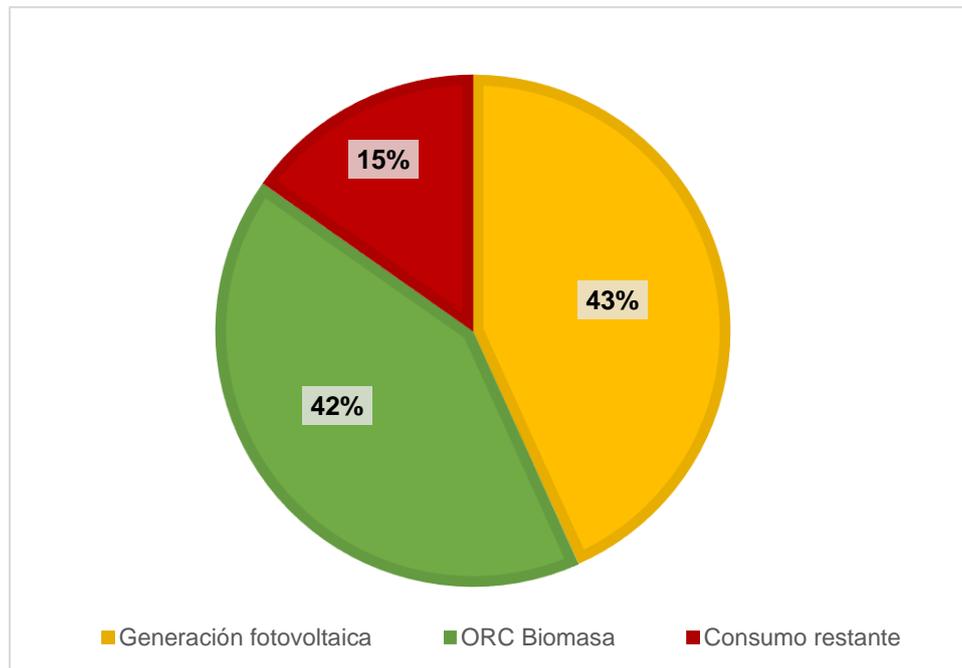


Ilustración 6.6.- Capacidad de generación desde biomasa y energía solar.

Por un lado, la alternativa referida al aprovechamiento vegetal, obtiene una capacidad de generación que alcanza los 524kWh mediante la tecnología ORC. Dicho valor lleva a concluir que, con la producción vegetal ofrecida únicamente por un cultivo de estas características, cuenta con una aportación limitada mostrada en la Ilustración 6.6. Por otro lado, la incorporación de baterías a la instalación solar muestra que una capacidad de 2kWh consiste en un aprovisionamiento del 75% del consumo, generando 803kWh sobre los 1075kWh de consumo que resultaría debido a la innecesariedad de la máquina peletizadora.

Como se ha podido observar hasta el momento, tanto la alternativa de generación por ORC como el almacenamiento en baterías no logran suplir la insuficiencia eléctrica mostrada en la utilización del sistema fotovoltaico para abastecer las diferentes actividades a desarrollar en el huerto escuela. Debido a esto, se han tenido que tomar medidas para poder llevar a cabo un sistema más eficaz de generación.

Para ello, se han analizado diferentes variantes y lograr resolver así la insuficiencia mostrada por los sistemas mencionados previamente.

En primer lugar, pensando en la alternativa de baterías de litio, se ha optado por disminuir el factor de limitación de descarga de las baterías. Tras los resultados obtenidos en el

apartado 6.4 se ha observado la gran ventaja que suponen las baterías para el sistema, por lo que, en pos de obtener un mayor aprovechamiento de estos elementos, se ha disminuido su valor de limitación de descarga hasta un 15%.

Por otro lado, se ha replanteado la capacidad fotovoltaica del sistema, donde las pérdidas que ocurren desde la absorción de los fotones hasta su transformación en electricidad, ha terminado por considerar un redimensionamiento del sistema fotovoltaico hasta una potencia mínima de 4.5kW, pudiendo así abastecer de manera más eficiente las máquinas de mayor potencia del proceso.

Los resultados obtenidos han demostrado que la reducción del limitador de descarga favorece un mayor aprovechamiento de las baterías, aunque esto pudiera acarrear un menor tiempo de vida del sistema de almacenamiento. No obstante, dicha modificación no ha sido suficiente para lograr abastecer completamente el consumo anual, por lo que se ha optado por investigar mayores capacidades de generación solar. Se puede observar en la Tabla 6.8 que, igual que se observó en el apartado 6.4, el valor referente a la capacidad de almacenamiento sobresale como el factor que determina el completo abastecimiento de los equipos locales. Todo ello manteniendo un valor del 15% como limitador de descarga para las baterías. Por otro lado, parece ser que el ORC no consigue cumplimentar sistemas de generación fotovoltaica de mayor potencia hasta el punto de lograr abastecer totalmente el sistema.

Tabla 6.8.- Escenarios analizados con sus respectivos valores de consumo y abastecimiento.

Escenario		Consumo (kWh/año)	Capacidad de generación (kWh/año)			
Pellets	Horno		4,5kW + 2kWh	5,5kW + 12kWh	4,5kW + ORC	6kW + ORC
✓	✓	1262,59	1005,27	1258,55	1097,63	1150,66
	✓	1074,51	839,67	1070,30	-	-
✓		782,72	758,53	782,89	884,33	911,27
		594,64	592,93	594,64	-	-

Dicho lo cual, se concluye que la tecnología ORC fundamenta su viabilidad en un sistema híbrido en el que una pequeña batería pueda abarcar el arranque del sistema ORC y otros pequeños consumos diarios. La significativa mejora en el desempeño mostrado en la Ilustración 6.2 y Tabla 6.8 por la incorporación de una capacidad de almacenamiento de 2kWh parece ser el escenario más apropiado para desarrollar, simultáneamente, un sistema

de aprovechamiento de la biomasa como combustible. De esta manera, el sistema contaría con una capacidad de generación superior a la demanda en más de un 20%, como se explica más adelante. La opción destinada al uso exclusivo de energía solar con almacenamiento en baterías en cambio, obtiene una capacidad de completo abastecimiento mediante un sistema que contempla 5.5kW de potencia fotovoltaica instalada asistida por un total de 12kWh de almacenamiento en batería.

Una capacidad de almacenamiento que atribuye al proceso de deshidratación, junto al consumo del hogar (374.19kWh/año), la responsabilidad del alto consumo realizado en periodos de poca generación fotovoltaica. Precisamente su operación por 24 horas para llevar a cabo el secado de las hojas de moringa, cuenta con un consumo desprovisto al mes de 14 a 31kWh. A raíz de este razonamiento, se ha propuesto analizar la actuación del sistema en caso de prescindir de un proceso de deshidratación artificial y se ha incluido en la Tabla 6.8. La opción de secado natural por sol o sombra es una práctica habitual en huertos de estas características, a pesar de incrementar la posibilidad de degradación del producto. De esta manera, se han extraído varios escenarios diferentes mediante los resultados conseguidos.

- 1) Sistema fotovoltaico compuesto por 5.5kW de potencia fotovoltaica con una capacidad de almacenamiento en batería de 12kWh.
- 2) Incorporación de sistema ORC sobre un sistema fotovoltaico compuesto por 4.5kW de potencia fotovoltaica y un almacenamiento en baterías de litio de 2kWh.
- 3) Sustitución de etapa de deshidratación artificial por secado natural. Opción del sistema fotovoltaico, compuesto por 4.5kW de potencia y 2kWh de almacenamiento en baterías.

Todas ellas, exceptuando la última alternativa, consisten en un importante incremento del coste total del sistema respecto al analizado al inicio de este apartado. Esto significa un factor importante en un proyecto de estas características que, sin existir una limitación real para el presupuesto de este proyecto, ha sido un dato considerado a lo largo de todo el trabajo para llevar a cabo un sistema auténtico. Por ello, la tercera opción previamente descrita encaja de mejor manera en un contexto de menor presupuesto y mayor permisibilidad de un sistema de menor rendimiento.

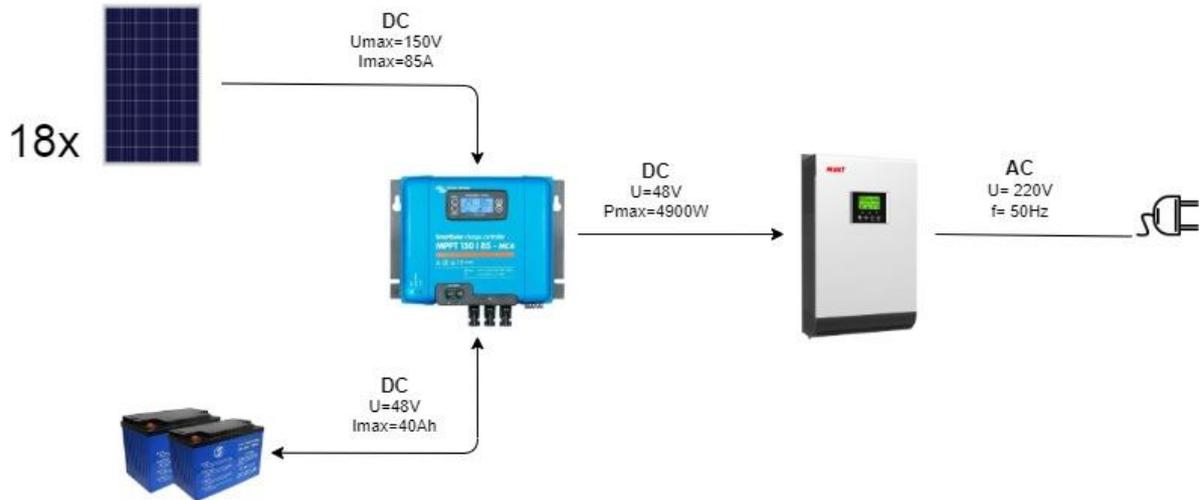


Ilustración 6.7.- Esquema de generación solar (4.5kW) con generación auxiliar en baterías de litio (2kWh).

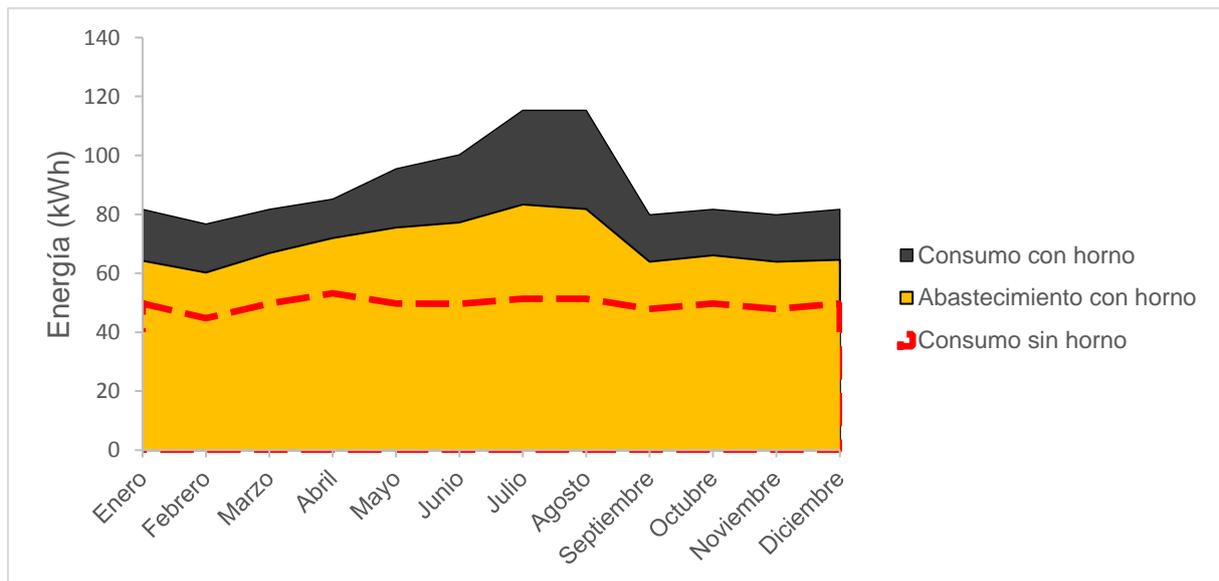


Ilustración 6.8.- Capacidad de abastecimiento del sistema solar PV (4.5kW) con baterías (2kWh).

Como puede observarse, los resultados obtenidos en la Tabla 6.8 han justificado la incorporación de una capacidad de 2kWh al sistema hasta alcanzar un abastecimiento del 80% en el escenario con horno, respecto al 45% obtenido de trabajar únicamente con 4.5kW fotovoltaicos.

Además, en caso de optar por el proceso de deshidratación natural, se ha observado en la Tabla 6.8 el completo abastecimiento eléctrico que se produce y que se indica mediante una línea roja en la Ilustración 6.8. Llegados a este punto, se podría plantear un proceso térmico de deshidratación que aprovechara la biomasa que se ha descrito a lo largo del proyecto, de manera que no fuera necesario su transformación previa a electricidad.

Por otro lado, también se ha contemplado la posibilidad de llevar a cabo un sistema de generación que abarque completamente el consumo realizado. Para ello, es necesario incrementar la capacidad de generación mediante el primero o el segundo escenario, siendo ambos válidos. En este punto, se ha querido seguir adelante con la alternativa que se ha planteado a lo largo de buena parte del proyecto, el aprovechamiento de la tecnología ORC para abastecer esa fracción eléctrica que no consigue el sistema por la incorporación de secado artificial. A continuación se explica de manera más extensa la preferencia por la incorporación de un sistema de aprovechamiento de biomasa respecto al redimensionamiento del sistema solar, no obstante, esta elección se fundamenta principalmente sobre un razonamiento energético, observando los beneficios que la hibridación del sistema de generación puede ofrecer en un escenario de estas características.

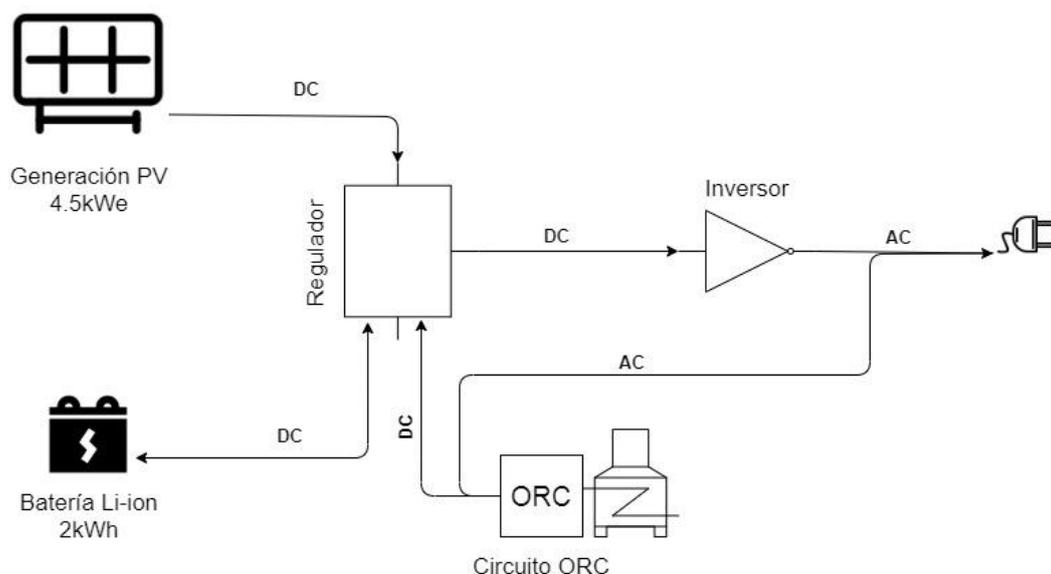


Ilustración 6.9.- Sistema híbrido de generación solar y ORC auxiliar.

Se había observado en la Tabla 6.8 que la combinación exclusiva de generación fotovoltaica y biomasa por ORC mostraba carencias. No obstante, el marco cambia totalmente con la combinación de un pequeño almacenamiento de baterías con el ORC, logrando así abastecer el déficit del 20% respecto al consumo mediante un sistema de generación independiente.

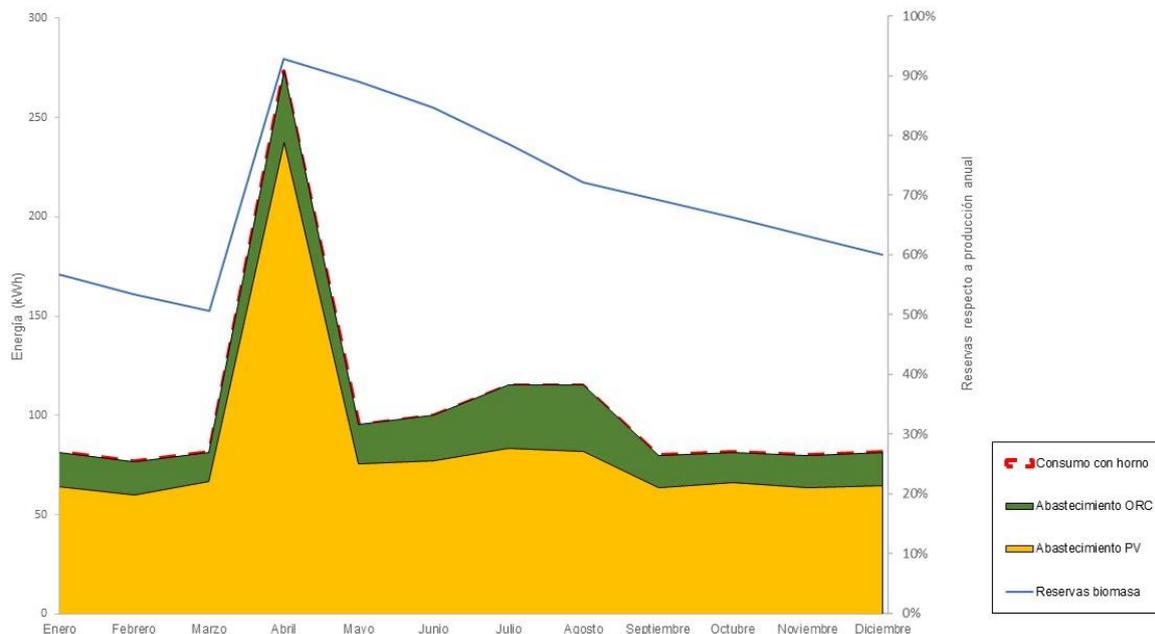


Ilustración 6.10.- Capacidad de abastecimiento del sistema híbrido con ORC y baterías (2kWh).

La realización de un sistema híbrido ofrece innumerables ventajas. En primer lugar, hay que mencionar que el mismo proyecto de Cultivant Vida plantea, mediante la educación agrícola y propios cultivos, la expansión de huertos de *Moringa oleifera* en los pueblos y terrenos circundantes. Esto propone un escenario donde existe un incremento de producción vegetal y, por ende, mayor consumo para su tratamiento, lo que puede significar un contratiempo energético. La tecnología ORC muestra entonces buenas características como una amplia versatilidad de potencia y posibilidad de cogeneración, que logran mayor interés cuanto mayor sea el recurso combustible. Este combustible además, a diferencia del sistema base compuesto por fotovoltaica y baterías, ofrece una generación completamente independiente por ser un recurso sólido y manipulable, mostrando también una proporcionalidad respecto a la producción de moringa que resulta muy interesante para albergar un posible incremento de producción vegetal.

Aproximadamente 188kWh eléctricos hacen falta para la transformación de la biomasa residual del huerto en pellets aplicables en el sistema ORC. Unas reservas que, según se ha calculado previamente, logran una capacidad de generación eléctrica de 524kWh. De esta manera, se encuentra un proceso de peletización que cuenta con un consumo considerable de electricidad, pero que se presenta como una manera muy eficiente de poder transformar la energía variable del sol en una fuente manipulable como es la biomasa sólida. Es decir, tal como se observa en la Ilustración 6.10 el sistema aprovecha la energía solar de manera prioritaria, con un soporte auxiliar por parte de un combustible producido localmente.

Por otro lado, previamente ya se ha mencionado que un sistema con un completo abastecimiento eléctrico se consideraba, a causa de incorporar un sistema de generación auxiliar superior, una inversión importante de dinero, tras lo que se seleccionaba la alternativa del ORC para seguir una misma línea con la producción vegetal local.

Dicho lo cual, África Subsahariana se encuentra en una transición hacia el abaratamiento de tecnologías de generación eléctrica. No obstante, ese continuo descenso del precio, la participación de organizaciones extranjeras y la contradicción de información en este tipo de documentos, no permite saber a ciencia cierta los costes a los que podrían ascender las alternativas planteadas.

Por un lado, a pesar de la rápida globalización, es evidente que el territorio africano cuenta con una infraestructura inferior a la que se puede encontrar en territorio europeo, por lo que cuenta con un mercado más encarecido respecto a la media global. El trabajo publicado por IRENA (2016) engloba los precios de la fotovoltaica en el territorio y, de esta manera, se ha estimado para el sistema con las presentes características un coste de capital de 2.2€/W para los paneles, 2€/W para las baterías y 1€/W para el resto de sistemas de acondicionamiento solar [55]. A esto, hay que incluir unos costes de operación y mantenimiento equivalentes al 2.5% de la inversión inicial. [15]

Por el otro lado, la tecnología ORC se considera una tecnología más novedosa, pero ya cuenta con varias compañías que fabrican y distribuyen este sistema de generación. Para el caso de África, no obstante, no se han podido determinar unos datos locales, por lo que se han empleado datos de otros mercados. De esta manera, se ha estimado un valor aproximado de 3500€/kW de inversión [41] y unos costes de mantenimiento de 750€/año [50]. Para mayor rigurosidad, se ha obtenido también un presupuesto desde una compañía

extranjera para un sistema ORC de 11kWe de generación con salida AC, que se ha incorporado en la Tabla 6.9 por su similitud al sistema planteado en este trabajo.

Tabla 6.9.- Análisis económico de los escenarios de generación.

Escenario	Características	Inversión (€)	O&M (€/año)
Escenario base (3)	4,5kW PV + 2kWh baterías	18400	460
Redimensionamiento E.Solar (1)	5,5kW PV + 12kWh baterías	41600	1040
Incorporación ORC	Sistema ORC	72674	750
Escenario definitivo (2)	Escenario base + ORC	91074	1210

Como puede observarse, el precio obtenido mediante el presupuesto del sistema ORC sobrepasa los valores teóricos mencionados previamente. Este incremento indica además la envergadura de esta inversión ORC, con valores superiores a las alternativas previamente descritas. A pesar de ello, el interés sobre un aumento de producción vegetal, sigue amparando la gran utilidad que ofrece la hibridación del sistema.

7 ALTERNATIVAS

A continuación se resumen brevemente algunas alternativas que buscan avanzar un paso más y mejorar los resultados que un sistema de este ámbito puede tener en esta localización. Debido a que gran parte del trabajo se ha enfocado en el aprovechamiento de la biomasa resultante desde el procesamiento de la moringa, las alternativas propuestas se han enfocado principalmente en tratar de beneficiar la utilidad de este proceso. Mencionar que consisten en alternativas que no se han investigado de manera extensa a lo largo del trabajo, pero que resultan interesantes para augurar una mejor actuación del sistema propuesto.

Por un lado, el rendimiento del ORC a reducidos valores de potencia ha significado un factor importante a la hora de determinar su viabilidad en el proyecto. Un mayor tamaño del sistema solventaría dicho problema, aunque la actual limitada producción de combustible vegetal y la innecesariedad de grandes valores de generación rebaten esa posibilidad. No obstante, la tecnología ORC cuenta con la gran virtud de poder ser utilizada a modo de cogeneración simultánea de electricidad y calor. Esta posibilidad incrementa exponencialmente el rendimiento del proceso y, por tanto, el interés sobre esta tecnología. Alcanzando un rendimiento aproximado del 85%, el aprovechamiento simultáneo de la generación eléctrica ORC para calentar agua sanitaria, ofrecería un sistema más completo y de mejor desempeño.

Continuando en la línea de generación desde biomasa, este aprovechamiento de restos vegetales muestra otra llamativa característica. Existen estudios que se han hecho eco de las grandes propiedades fertilizantes con las que cuentan las cenizas restantes de la quema de diferentes biomásas. Debido a esto, resultaría interesante plantear un análisis fisicoquímico sobre la utilización de cenizas de combustión de moringa precisamente en un entorno agropecuario como ocurre en el presente proyecto.

Por último, es evidente que este paso hacia la electrificación de zonas aisladas del grid sirve como ejemplo para otros casos de características similares a lo largo del territorio. Esto, junto a la ampliación de cultivos de moringa propuesta por Cultivant Vida, ofrece una mayor capacidad por parte del aprovechamiento de residuos de moringa. A raíz de esto, ha surgido la idea de poder utilizar los pellets producidos en el huerto u otras fuentes de biomasa, para poder situar un sistema ORC que afronte las intermitencias que la energía solar pudiera provocar en plataformas multifuncionales o microrredes locales, trabajando bajo condiciones

de rendimientos superiores. Ahora bien, para llevar a cabo esta propuesta, una mayor producción u obtención de biomasa haría falta para paliar las insuficiencias eléctricas de manera efectiva.

8 CONCLUSIONES

Una vez completado el apartado referente a los cálculos, se ha podido diseñar un sistema final en el que un criterio local debe determinar si el sistema solar con baterías es suficiente, como resultado de la sustitución del horno, o debe de complementarse con un sistema ORC de aprovechamiento vegetal. No obstante, en este apartado se han resumido las conclusiones que han podido extraerse a lo largo de la realización del proyecto.

En primer lugar se observa que la situación y evolución actual del grid nacional en Gambia favorece el desarrollo de sistemas de generación descentralizada. Dicho esto, su incorporación sobre las principales actividades nacionales, de los que destaca la agricultura, puede significar una rápida expansión de la electrificación del país.

La figura del huerto escuela sirve para diferentes actividades, tal como se ha descrito previamente, pero también sirve de ejemplo para la realización de más cultivos de moringa. Con una superficie de 0.25ha, tanto su distribución como ritmo de cultivo han servido para poder establecer los procesos necesarios para el procesado vegetal. De esta manera, se observa un consumo repartido a lo largo del año pero con picos en los meses lluviosos de verano.

Este perfil de consumo, aprovechando los altos valores de irradiación en el territorio, se ha provisto de un sistema de generación solar fotovoltaica como fuente principal. Se ha seleccionado una orientación horizontal para aprovechar las buenas propiedades ofrecidas en verano pero la insuficiencia mostrada por esta tecnología ha planteado la incorporación de un sistema auxiliar de generación.

Por un lado, el almacenamiento en baterías ha significado una mejora importante, sobretodo a bajas capacidades, a la hora de intervenir en la generación fotovoltaica. No obstante, la fracción correspondiente al consumo no abastecido por la solar fotovoltaica necesita de una gran capacidad de almacenamiento, sobresaliendo esa capacidad respecto a la potencia solar instalada. De esta manera, se comprende un redimensionamiento considerable del sistema de generación en caso de valorar únicamente el almacenamiento en baterías.

Origen de gran parte del consumo desprovisto según los cálculos reside en el proceso de secado artificial, etapa que se ha considerado su desestimación pero solo en caso de que el secado natural ofrezca resultados suficientes para una adecuada conservación del producto.

Por otro lado, se ha observado que el procesamiento local cuenta con fracciones vegetales aprovechables para una generación auxiliar desde esa biomasa. La estimación realizada, mediante correlaciones teóricas, de las propiedades caloríficas de estos recursos han concluido en un combustible vegetal dentro del rango habitual marcado por biomásas clásicas como la madera y restos de arroz o maíz.

Esta producción vegetal, en cambio, es de un valor limitado, por lo que se selecciona la tecnología ORC como sistema de generación de baja potencia desde una biomasa que no cuenta aún con unas características muy definidas. Esta generación no consigue componer, junto a la solar fotovoltaica, un sistema suficiente de completo abastecimiento, por lo que únicamente la incorporación del ORC no consiste en una alternativa viable. Precisamente los rangos tan bajos de trabajo y el limitado combustible para su funcionamiento significan los motivos de su bajo rendimiento.

En este punto se plantea la asociación entre un pequeño almacenamiento de baterías con una generación auxiliar desde ORC, logrando sobreponer su capacidad de generación al consumo total. De esta manera, se obtiene un sistema híbrido que ofrece mayor disposición ante una hipotética expansión de producción de moringa. Dicho esto, a pesar de plantear un empleo de máquinas en cadena, existe la posibilidad de incorporar más producto vegetal, que también significaría mayor combustible provechoso en el ORC.

La hibridación de sistemas energéticos parece ser una solución muy eficiente e innovadora, capaz de variar en mayor medida su potencia de salida y permitiendo una superior independencia gracias a la producción in situ del combustible. De esta manera, la capacidad de generación que corresponde al combustible vegetal resulta en el 42% del consumo de

El precio obtenido para el sistema ORC, en cambio, muestra un coste de inversión muy elevado, superior a la tecnología fotovoltaica. Se han respetado las condiciones que pueden existir localmente, pero se ha planteado la incorporación de tecnología ORC precisamente por su buena afinidad con el esperado incremento de producción vegetal en el territorio.

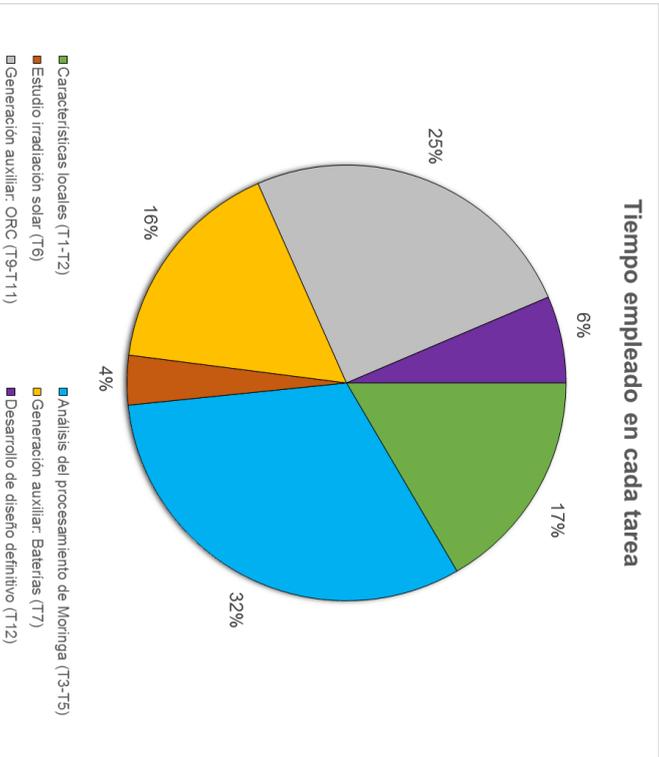
Por último, este proyecto ha tratado de seguir la misma línea marcada por ambas asociaciones colaboradoras. Por un lado, impulsa una igualdad de género muy castigada en el país mediante un apoyo sobre una de las actividades más protagonizada por las mujeres, como es el caso de la agricultura. Por otro lado, una generación eléctrica respetuosa con el medioambiente permite la educación y concienciación de jóvenes sobre las grandes

propiedades que presentan tanto la energía solar como la moringa producida en el huerto escuela. Mediante este proyecto, y gracias a organizaciones como Cultivant Vida y M'Bole Association, se trata de augurar por un prospero futuro en Gambia y abrir así un abanico de nuevas posibilidades.

9 DIAGRAMA DE GANTT

Tarea	JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE					OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				FEBRERO			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	
Tarea 1	Busqueda bibliográfica: Situación y abastecimiento energético nacional.																																				
Tarea 2	Ubicación del lugar de actuación y características locales.																																				
Tarea 3	Busqueda bibliográfica: Propiedades y tratamiento de la Moringa.																																				
Tarea 4	Valoración del mercado y selección de equipos de procesado.																																				
Tarea 5	Estimación consumo energético por labores locales.																																				
Tarea 6	Análisis de condiciones de irradiación solar.																																				
Tarea 7	Diseño y caracterización de la generación solar PV																																				
Tarea 8	Reunión de planificación con el tutor																																				
Tarea 9	Busqueda bibliográfica: Combustible vegetal desde la Moringa.																																				
Tarea 10	Biomasa: Análisis de propiedades energéticas.																																				
Tarea 11	Biomasa: Valoración de mercado y su viabilidad como generación auxiliar.																																				
Tarea 12	Resolución de sistema de generación definitivo.																																				

Tiempo empleado en cada tarea



10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Renewable Energy: Jobs and Access., IRENA, Junio 2012..
- [2] «The World Bank in The Gambia,» The World Bank, Marzo 2020. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/country/gambia/overview>.
- [3] «Gambia GDP,» Trading Economics, Julio 2020. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/gambia/gdp>.
- [4] G. Ragusa, «Overview of the Fisheries Sector in the Gambia,» *Fisheries and Aquaculture Journal.*, 2014. doi: 10.4172/ 2150-3508.1000107.
- [5] Electricity Strategy and Action Plan, AF-Mercados EMI, Diciembre 2012.
- [6] Annual Report and Financial Statement of PURA, Public Utilities Regulatory Authority, 2017.
- [7] Gambia electricity restoration and modernization project., The World Bank, 2018.
- [8] «Noticia: "GAMBIA: State and partners launch renewable energy programme",» Afrik21, 10 Octubre 2019. [Online]. Available: <https://www.afrik21.africa/en/gambia-state-and-partners-launch-renewable-energy-programme/>.
- [9] «Noticia: "EIB, EU and World Bank to support a renewable energy programme in Gambia",» PowerTechnology, 2019. [Online]. Available: <https://www.power-technology.com/news/eib-eu-world-bank-gambia/>.
- [10] L. K. Marong, S. Jirakiattikul y K. Techato, «The Gambia's future electricity supply system: Optimizing power supply for sustainable development.,» *Energy Strategy Reviews*, pp. 179-194, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.03.001>.
- [11] «Gambia, the energy 2020,» CIA World Factbook, Enero 2020. [Online]. Available: https://theodora.com/wfbccurrent/gambia_the/gambia_the_energy.html.
- [12] «Noticia: "New power plant to feed 18MW into the Gambia national grid".,» Esi-Africa newsletter, Octubre 2019. [Online]. Available: <https://www.esi-africa.com/industry-sectors/generation/new-power-plant-to-feed-18mw-into-the-gambia-national-grid/>.
- [13] «Noticia: "Gambia Sahay solar wants to build a solar power plant in the country",» Afrik21, Noviembre 2019. [Online]. Available: <https://www.afrik21.africa/en/gambia-sahay-solar-wants-to-build-a-solar-power-plant-in-the-country/>.

- [14] Estimating the Renewable Energy Potential in Africa, IRENA, 2014.
- [15] S. Baurzhan y G. P. Jenkins, «Off-grid solar PV: Is it an affordable or appropriate solution for rural electrification in Sub-Saharan African countries?,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1405-1418, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.016>.
- [16] R. Y. Yang, L. C. Chang, J. C. Hsu, B. B. Weng, M. C. Palada, M. Chadha y V. Levasseur, «Nutritional and Functional Properties of Moringa Leaves - From Germplasm, to Plant, to Food, to Health.,» *Moringa and other highly nutritious plant resources: Strategies, standards and markets for a better impact on nutrition in Africa.*, 2006.
- [17] A. K. Al-Asmari, S. M. Albalawi, M. T. Athar, A. Q. Khan, H. Al-Shalhrani y M. Islam, «Moringa oleifera as an Anti-Cancer Agent against Breast and Colorectal Cancer Cell Lines,» *PLoS ONE*, 2015. doi:10.1371/journal.pone.0135814.
- [18] F. El-Massry, M. Mossa y S. M. Youssef, «Moringa Oleifera plant "Value and utilization in food processing",» *Egypt. J. Agric.*, nº 91, 2013.
- [19] D. Sánchez-Machado, J. López-Cervantes y J. Nuñez-Gastélum, «High-performance liquid chromatography method to measure alpha- and gamma-tocopherol in leaves, flowers and fresh beans from Moringa Oleifera,» *Journal of Chromatography*, pp. 111-114, 2005. doi:10.1007/s12161-009-9106-z.
- [20] V. Melo, «Moringa oleifera L.- An underutilized tree with macronutrients for human health,» *Emir. J. Food Agric.*, pp. 785-789, 2013. doi: 10.9755/ejfa.v25i10.17003.
- [21] H. Makkar y K. Becker, «Nutritional value and antinutritional components of whole and ethanol extracted Moringa oleifera leaves,» *Animal Feed Science Technology*, nº 63, pp. 211-228, 1996.
- [22] W. Nouman, M. Siddiqui, S. Basra, M. Zubair, H. Farooq y T. Gull, «Biomass production and nutritional quality of Moringa oleifera as field crop.,» *Turkish journal of Agriculture and Forestry*, 2013. doi:10.3906/tar-1206-29.
- [23] S. El Sohaimy, G. Hamad, S. Mohamed, M. Amar y R. Al-Hindi, «Biochemical and functional properties of Moringa oleifera leaves and their potential as a functional food,» *Global Advanced Research Journal of Agricultural Science*, vol. 4, pp. 188-199, 2015.
- [24] A. Ali, Y. Yusof, L. Chin y M. Ibrahim, «Processing of Moringa leaves as natural source of nutrients by optimization of drying and grinding mechanism,» *Journal of Food Process Engineering*, 2017. doi:10.1111/jfpe.12583.
- [25] F. Gomes Pereira, C. Cavassano Galvão, V. Lima, M. da Rocha, A. Schuler, V. da Silva

- y N. de Lima Filho, «The versatility of the *Moringa oleifera* oil in sustainable applications,» *Oilseeds & fats Crops and Lipids (OCL)*, 2016. doi:10.1051/ocl/2016027.
- [26] A. Leone, A. Spada, A. Battezzati, A. i. Schirald, J. Aristil y S. Bertoli, «*Moringa oleifera* Seeds and Oil: Characteristics and Uses for Human Health,» *Molecular Sciences*, p. 2141, 2016. doi:10.3390/ijms17122141.
- [27] M. Godino, S. Villegas, M. Izquierdo, J. Velásquez y R. Vargas, «Evaluación del uso energético de la *Moringa oleifera*,» de *6º Congreso Forestal Español*, 2013.
- [28] N. Foidl, H. Makkar y K. Becker, «The potential of *Moringa oleifera* for agricultural and industrial uses.,» *Moringa Oleifera Webapage*, Diciembre 2001.
- [29] F. Gomes Pereira, A. Ribeiro Bastos da Silva, C. Cavassano Galvão y V. Lima, «*Moringa oleifera* as Sustainable Source for Energetic Biomass,» *International Journal of Chemistry*, vol. 7, nº 2, 2015. doi:10.5539/ijc.v7n2p177.
- [30] U. Rashid, F. Anwar, B. Moser y G. Knothe, «*Moringa oleifera* oil: A possible source of biodiesel,» *Bioresource Technology*, nº 99, pp. 8175-8179, 2008. doi:10.1016/j.biortech.2008.03.066.
- [31] W. K. Biswas, *Life Cycle Assessment of Biodiesel Production from Moringa Oleifera Oilseeds*, 2008.
- [32] S. Channiwala y P. Parikh, «A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels,» *FUEL*, nº 81, p. 1051, 2002.
- [33] *Methodology for Thermal Efficiency and Energy Input Calculations and Analysis of Biomass Cogeneration Unit Characteristics*, U.S. Environmental Protection Agency, 2007.
- [34] Energypedia, «Biomass Gasification (Small Scale),» [Online]. Available: [https://energypedia.info/wiki/Biomass_Gasification_\(Small-scale\)#:~:text=Appraisal%20and%20Challenges-,Gasification%20technology%20is%20principally%20well%20suited%20for%20small%20power%20plants,gasoline\)%20engines%20and%20diesel%20engines..](https://energypedia.info/wiki/Biomass_Gasification_(Small-scale)#:~:text=Appraisal%20and%20Challenges-,Gasification%20technology%20is%20principally%20well%20suited%20for%20small%20power%20plants,gasoline)%20engines%20and%20diesel%20engines..)
- [35] M. Salomón, T. Savola, A. Martin, C. J. Fogelholm y T. Fransson, «Small-scale biomass CHP plants in Sweden and Finland,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 15, pp. 4451-4465, 2011. doi:10.1016/j.rser.2011.07.106.
- [36] S. Quoilin, S. Declaye y V. Lemort, «Expansion machine and fluid selection for the organic rankine cycle,» *7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT)*, July 2010.

- [37] «World overview of the Organic Rankine Cycle technology,» ORC World Map, Agosto 2019. [Online]. Available: <https://orc-world-map.org/#>.
- [38] U. Drescher y D. Brüggermann, «Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants,» *Applied thermal engineering*, vol. 27, pp. 223-228, 2007. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.04.024.
- [39] F. Calise, C. Capuozzo y L. Vanoli, «Design and parametric optimization of an Organic Rankine Cycle powered by solar energy,» *American Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 6, pp. 178-204, 2013. doi:10.3844/ajeassp.2013.178.204.
- [40] A. Rettig, M. Lagler, T. Lamare, S. Li, V. Mahadea, S. McCallion y J. Chernushevich, «Application of Organic Rankine Cycles (ORC),» *World Engineers' Convention. Genova*, Septiembre, 2011.
- [41] L. Tocci, T. Pal, I. Pasmazoglou y B. Franchetti, «Small Scale Organic Rankine Cycle (ORC): A techno-economic review,» *Energies*, 2017. doi:10.3390/en10040413.
- [42] «The Engineering Toolbox,» [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/toluene-methylbenzene-properties-d_2095.html.
- [43] Z. Ge, J. Li, Y. Duan, Z. Yang y Z. Xie, «Thermodynamic performance analyses and optimization of dual-loop Organic Rankine Cycles for Internal Combustion engine waste heat recovery.,» *Applied sciences*, vol. 9, p. 680, 2019. doi:10.3390/app9040680.
- [44] M. Kane, «Research, development & commercialization of ORC modules in Switzerland,» *Schweizer ORC Symposium*, Noviembre, 2014..
- [45] S. Gusev, D. Ziviani, I. Bell, M. De Paepe y M. Van Den Broek, «Experimental comparison of working fluids for Organic Rankine Cycle with single-screw expander,» *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Purdue.*, Julio, 2014.
- [46] G. A. Longo, «Refrigerant R134a condensation heat transfer and pressure drop inside a small brazed plate heat exchanger,» *International Journal of Refrigeration*, pp. 780-789, 2007. doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.11.017.
- [47] V. R. Patil, V. Irappa, P. Garg y M. Orosz, «Techno-economic comparison of solar Rankine cycle (ORC) and photovoltaic (PV) systems with energy storage,» *Renewable Energy*, Junio, 2016. doi:10.1016/j.renene.2017.06.107.
- [48] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef y V. Lemort, «Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, p. 168.186, 2013. doi:10.1016/j.rser.2013.01.028.

- [49] I. Vankeirsbilck, B. Vanslambrouck, S. Gusev y M. De Paepe, «Organic Rankine Cycle as efficient alternative to steam cycle for small scale power generation,» *8th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT)*, Julio, 2011.
- [50] G. Kyriakarakos, E. Ntavou y D. Manolakos, «Investigation of the use of low temperature geothermal Organic Rankine Cycle engine in an autonomous polygeneration microgrid.,» *Sustainability*, vol. 12, p. 475, 2020. doi:10.3390/su122410475.
- [51] G. Legros, I. Havet, N. Bruce y S. Bonjour, *The Energy access situation in developing countries: A Review Focusing on the Least Developed Countries and Sub-Saharan Africa*, United Nations Development Programme (UNDP), 2009.
- [52] «Processing the Moringa Leaves into Powder,» *Miracle Trees*, 2020. [Online]. Available: <https://miracletrees.org/how-to-make-moringa-powder/>.
- [53] H. Cuadrado Capella, S. Mejía Kerguelén, A. Contreras Ávila, A. Romero Díaz y J. García Peña, «Manejo agronómico de algunos cultivos forrajeros y técnicas para su conservación en la región Caribe colombiana,» de *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica)*, Pronatta, 2003.
- [54] R. Iglesias Diaz, R. Grimaldi Gutiérrez, B. Villanueva Galindo, J. Hernández Jarquín, P. López de Paz y O. Lastres Danguillecourt, «Cinética de secado de Moringa Oleifera,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 9, nº 5, Agosto, 2018.
- [55] *Solar PV in Africa: Costs and markets*, IRENA, 2016.
- [56] E. Meierding, «Energy Security and Sub-Saharan Africa,» *Energie et développement*, pp. 55-73, 2011. doi:10.4000/poldev.744.
- [57] J. Corfee-Morlot, P. Parks, J. Ogunleye y F. Ayeni, *Achieving Clean Energy Access in Sub-Saharan Africa, Financing Climate Futures*, 2019.
- [58] «Agence Nationale de L'Aviation civile et de la Météorologie,» 1995-1997 y 2011-2013. [Online]. Available: <http://www.anacim.sn/meteorologie/>.
- [59] N. Reyes Sánchez, E. Spörndly y I. Ledin, «Effect of feeding different levels of foliage of Moringa Oleifera to creole dairy cows on intake, digestibility, milk production and composition.,» *Livestock Science*, nº 101, pp. 24-31, 2006. doi:10.1016/j.livprodsci.2005.09.010.
- [60] M. Godino García, «Moringa Oleifera: Árbol multiusos de interés forestal para el sur de la Península Ibérica,» *ADNAgro: Negocio Agroalimentario y Cooperativo*, 2016.

- [61] F. González Minero, «Un estudio transversal de *Moringa oleifera* Lam. (Moringaceae),» *Dominguezia*, vol. 34, nº 1, 2018.
- [62] J. Quintanilla Medina, J. Garay Martinez, E. Alvarado Ramirez, J. Hernández Meléndez, S. Mendoza Pedroza, A. Rojas Garcia, S. Joaquín Cancino y A. Hernández Garay, «Tiempo y temperatura sobre la pérdida de humedad y contenido de proteína en hojas de *Moringa Oleifera* Lam.,» *Agroproductividad*, vol. 11, nº 5, pp. 88-92, 2018.
- [63] B. S. Ogunsina, T. N. Indira, A. S. Bhatnagar, C. Radha, S. Debnath y A. G. Gopala Krishna, «Quality characteristics and stability of *Moringa oleifera* seed oil of Indian origin,» *Journal of Food Science and Technology*, vol. 51, nº 3, pp. 503-510, 2013. doi:10.1007/s13197-011-0519-5.
- [64] N. C. Alfaro y W. Martínez, *Uso Potencial de la Moringa (Moringa oleifera, Lam) para la Producción de Alimentos Nutricionalmente Mejorados*, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), 2008.
- [65] M. S. Mirhashemi, S. Mohseni, M. Hasanzadeh y M. S. Pishvae, «*Moringa oleifera* biomass-to-biodiesel supply chain design: an opportunity to combat desertification in Iran,» *Journal of Cleaner Production*, 2018. doi:10.1016/j.jclepro.
- [66] T. Radovich, «Production and Marketing profile for *Moringa (Moringa Oleifera)*,» *Farm and Forestry*, 2009.
- [67] WorldData, «Energy Consumption in the Gamvia,» [Online]. Available: <https://www.worlddata.info/africa/gambia/energy-consumption.php>.
- [68] H. Vermaak, «Techno-economic analysis of solar tracking systems in South Africa,» *Energy Procedia*, nº 61, pp. 2435-2438, 2014. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.018.
- [69] *Renewables 2015: Global Status Report*, REN21, 2015.
- [70] M. Rondón Macias, Y. Díaz Domínguez, E. Fernández Santana y D. Tabio Garcia, «Obtención de biodiesel a partir de aceites de origen vegetal, "*Moringa oleifera*",» 2017. doi:10.13140/RG.2.2.17816.60160.
- [71] D. Gómez Mitjans, V. Pita Bravo y B. Zumalacárregui de Cárdenas, «Caracterización de aceites de las semillas de *Moringa oleifera* a partir de la extracción por diferentes métodos,» *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 18, nº 2, pp. 106-111, 2016. doi:10.15446/rev.colomb.biote.v18n2.54324.
- [72] J. Tsaknis, V. Gergis, S. Lalas y V. Spiliotis, «A total characterisation of *Moringa oleifera* Malawi seed oil,» *La Rivista Italiana delle Sostanze Grasse*, vol. 75, pp. 21-27, 1998.

- [73] T. Hung, S. Wang, C. Kuo, B. Pei y K. Tsai, «A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources,» *Energy*, vol. 35, pp. 1403-1411, 2009. doi:10.1016/j.energy.2009.11.025.
- [74] C. Kuo, S. Hsu, K. Chang y C. Wang, «Analysis of a 50kW organic Rankine cycle system,» *Energy*, vol. 36, pp. 5877-5885, 2011. doi:10.1016/j.energy.2011.08.035.
- [75] M. Pfeil, D. Denfeld, I. Tobío-Pérez, D. Denfeld, Y. Díaz, S. Pohl y R. Piloto-Rodríguez, «Characterization and assessment of *Jatropha curcas* and *Moringa oleifera* husk and their potential use in gasificación,» *Energ. Ecol. Environ.*, 2020. doi:https://doi.org/10.1007/s40974-020-00179-x.
- [76] J. Titiloye, M. Abu Bakar y T. Odetoye, «Thermochemical characterisation of agricultural wastes from West Africa,» *Industrial Crops and Products*, vol. 47, pp. 199-203, 2012. doi:10.1016/j.indcrop.2013.03.011.
- [77] N. Abdullah, M. Hussin, S. Sharifuddin y M. Mohamed, «Preparation and characterization of activated carbon from *Moringa oleifera* seed pod,» *Sci.Int (Lahore)*, vol. 29, pp. 7-11, 2017.
- [78] A. Algieri y J. Sebo, «Energetic Investigation of Organic Rankine Cycles (ORCs) for the Exploitation of Low-Temperature Geothermal Sources - A possible application in Slovakia,» *Procedia Computer Science*, vol. 109C, pp. 833-840, 2017.

ANEXOS

Anexo I. Plantas de generación eléctrica en funcionamiento on-grid actualmente.

Lugar	Entidad	Unidad	Marca	Año instalación	Potencia Instalada (kW)	Potencia disponible (kW)
Kotu	NAWEC	KPS-G1	Mirrless	1981	3000	2500
Kotu	NAWEC	KPS-G2	Mirrless	1981	3000	2500
Kotu	NAWEC	KPS-G3	Mirrless	1997	3400	2500
Kotu	NAWEC	KPS-G4	Deutz	2001	6400	5500
Kotu	NAWEC	KPS-G6	MAN	1990	6400	5500
Kotu	NAWEC	KPS-G7	Deutz	2001	6400	5500
Kotu	NAWEC	KPS-G8	Deutz	2001	6400	5500
Kotu	NAWEC	KPS-G9	Deutz	2009	6400	5500
Brikama	NAWEC	BRK-G1	Deutz	2006	6400	5500
Brikama	NAWEC	BRK-G2	Deutz	2006	6400	5500
Brikama	NAWEC	BRK-G3	Deutz	2007	6400	5500
Brikama	NAWEC	BRK-G4	Deutz	2007	6400	5500
Brikama	IPP	BRK-G1	Deutz	2006	6400	5500
Brikama	IPP	BRK-G2	Deutz	2006	6400	5500
Brikama	IPP	BRK-G3	Deutz	2007	6400	5500
Brikama	IPP	BRK-G4	Deutz	2007	6400	5500
Batakunku	IPP		Windstorm SH	2008	1500	1500
Bansang	NAWEC			2006	600	540
Basse Santa-Su	NAWEC			2006	1400	1360
Basse unidad móvil	NAWEC				450	410
Essau	NAWEC			2006	460	400
Farafenni	NAWEC			2006	1400	1360
Kaur	NAWEC			2006	180	120
Kerewan	NAWEC			2006	220	180
Mansakonko	NAWEC			2006	1000	940
MacCarthy Island	NAWEC				270	250
Barra	NAWEC				2272	2000
Total GBA (MW)					94,1	80,5
Total Rural (MW)					8,3	7,6
TOTAL GAMBIA (MW)					102,4	88,1

Anexo II. Proyección (2016) de la capacidad eléctrica en Gambia, en un escenario independiente de proyecto hidroeléctrico y un escenario dependiente del proyecto hidroeléctrico. [10]

Proyección de capacidad eléctrica:	Fuentes fósiles						Fuentes renovables						TOTAL
	Fuelóleo ligero + pesado		Gas natural	Carbón	Solar fotovoltaico		Eólica	Solar térmica (5-40 MWe)	Biomasa	Importación Hidroeléctrica			
· Escenario EID:	Grid	Off-grid	Grid	Grid	Grid	Off-grid	Grid	Grid	Grid	Grid	Grid		
2015	98	63	-	-	-	-	3	-	-	-	-	164	
	647	40	-	-	-	-	7	-	-	-	-	694	
2016	98	63	-	-	-	-	6	-	-	-	-	167	
	686	168	-	-	-	-	14	-	-	-	-	868	
2018	149 (147)	62 (63)	-	-	20	6	6 (16)	-	-	-	-	243 (251)	
	814 (789)	31	-	-	38	21	14 (38)	-	-	-	-	918	
2020	183 (181)	50 (61)	-	-	60 (70)	12	6 (44)	-	-	-	-	311 (368)	
	704 (355)	19 (32)	-	-	179 (198)	43	14 (110)	-	-	-	0 (219)	959 (957)	
2025	223 (221)	50 (49)	6	-	137	27	58	-	-	-	-	501 (498)	
	448 (229)	16	42	-	390	96	146	-	-	-	0 (219)	1138	
2030	221 (218)	50 (49)	6	-	140	62	64	25	-	-	-	568 (564)	
	391 (172)	18 (17)	42	-	431 (432)	188	162	109	-	-	0 (219)	1341	

Anexo III. Escenarios energéticos probables para el futuro de Gambia. [5]

Linea base	Seguir una tendencia de generación fósil. Aumento del uso de fuelóleo con equipamiento nuevo e incorporación del carbón.
Linea base (Sin Carbón)	Plantas de generación fósil de menores dimensiones, y sin la explotación del carbón, que permitan una generación más distribuída.
Biomasa por precios altos	El constante crecimiento de las fuentes fósiles importadas propone la posibilidad de sustitución por Biomasa local.
Objetivo renovable	Tratar de abastecer a la población simultáneamente con el objetivo impuesto en 2015 del 35% en renovables. [69]
Off-grid	La implementación de sistemas off-grid renovables con la idea de generar microrredes verdes y un abastecimiento más distribuído.
OMVG	En base al proyecto presentado previamente, la importación de energía hidroeléctrica.
OMVG con carbón	Supondría la innecesariedad por el fuelóleo actual, mediante un reemplazo con carbón e hidroelectricidad.

Anexo IV. Composición y propiedades del aceite extraído por prensado frío.

Ácido Graso	Composicion ^{a,b,c} (g/100g aceite)
C14:0 (mirístico)	0,08-0,10
C16:0 (palmítico)	5,40-7,43
C16:1 (palmitoléico)	1,16-1,50
C18:0 (esteárico)	4,01-5,80
C18:1 (oleico)	65,27-73,09
C18:2 (linoléico)	0,69-4,82
C18:3 (linolénico)	0,19-0,54
C20:0 (araquídico)	2,48-3,72
C20:1 (gondoico)	2,18-2,64
C22:0 (behénico)	5,84-6,74
C24:0 (lignocérico)	0,00-0,94
Abreviaciones: ^a Cromatografía gaseosa con detector de ionización por llama (CG-FID), ^b Método INA de cromatografía de gases con detector FID acoplado, ^c Cromatografía gaseosa equipado con columna Carbowax 20M	
[70,71,72]	

Anexo V. Composición restos de biomasa de la moringa.

	ANÁLISIS QUÍMICO				
	Carbono fijo(%)	Humedad (%)	Cenizas (%)	MV (%)	
Torta^a	8,26	10,38	6,28	75,08	
Cáscara^b	-	13,10	28,62	-	
Cascarilla^c	21,77	6,25	2,97	75,26	
	ANÁLISIS ELEMENTAL				
	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	N (%)
Torta^a	45,59	6,49	0,00	41,45	6,47
Cáscara^b	46,12	6,73	-	44,68	2,47
Cascarilla^c	51,49	6,65	0,56	36,80	1,52

^aTitiloye, et al. (2012); ^bAbdullah, et al. (2017); ^cPfeil, et al. (2020).

Anexo VI. Propiedades destacadas de los fluidos de trabajo.

Fluido orgánico ORC	Aceite térmico (circuito auxiliar)
<ul style="list-style-type: none"> • Buenas propiedades termodinámicas. • Calor latente. • Curva de vapor saturado con pendiente positiva. • Calor específico. • Temperatura y presión crítica. • Potencial de agotamiento de ozono (ODP) nulo. • Viscosidad • Bajo punto de fusión. • Alta densidad/bajo volumen específico. • Seguro. • Alta disponibilidad. • Económico. • Respetuoso con el medioambiente y la salud. • Factor de mérito • Coeficiente de expansión volumétrico bajo. • Compatible con materiales de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad térmica y química. • Alto calor específico. • Baja viscosidad. • No tóxico. • Baja inflamabilidad. • Compatible con materiales de trabajo. • Económico.
<p>[39,40,44,50,73,74]</p>	