

Sistematización

Asunto	Resultados e impactos del uso de generadores de calor que utilizan biomasa residual
Para	Andrea Cianferoni Fabio Scotto Comité Europeo para la Formación y Agricultura CEFA
Elaborado por	Mario A. Heredia S.
Lugar y fecha	Quito, 12 de Junio del 2022

1. Prefacio

En el Ecuador, la constitución del 2008 (capitulo N°7) establece la mitigación del cambio climático¹ como una responsabilidad de estado [1]. La constitución alienta “la eficiencia energética, el desarrollo y uso de tecnologías y prácticas ambientales y otras energías renovables de bajo impacto”. Así mismo, el artículo 414 establece que las fuentes de energía renovables tendrán que integrarse en la matriz energética garantizando que “la soberanía alimentaria y el balance de los ecosistemas no se vea amenazado, cuidando a la vez el derecho de la población al agua”. Sobre esta base constitucional el Ecuador ha desplegado una inversión sin precedentes para ampliar la infraestructura de producción de energía -principalmente hidroeléctrica- consolidando de este modo una potencia instalada total de aproximadamente 8000 MW_e [2]. Actualmente, se afirma que el 93 % de la energía que se produce en Ecuador proviene de fuentes renovables [3]. No obstante, en un contexto más amplio se nota que la electricidad representa apenas el 18% de la energía final que se consume en el territorio nacional siendo que el consumo de petróleo y sus derivados -principalmente sobre la forma de combustibles líquidos- representa el 78% (ver Figura 1).

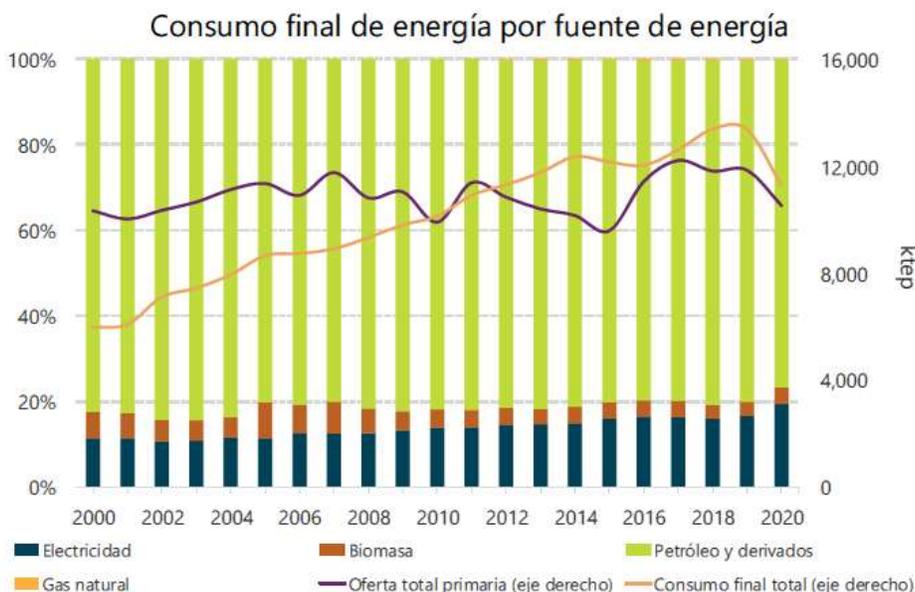


Figura 1. Consumo final de energía por fuente en Ecuador en el periodo 2000-2020 [3].

La Figura 1 muestra que el principal desafío en términos energéticos en Ecuador tendría que ver con la identificación de alternativas renovables que posibiliten la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a la conversión energética de combustibles líquidos derivados del petróleo. Los datos disponibles muestran que el diésel representa el 42% de la demanda total de combustibles líquidos [3]. Por lo tanto, en el contexto energético ecuatoriano, identificar alternativas factibles en lo técnico y económico que permitan reducir el consumo de diésel en todo tipo de operaciones es de la mayor pertinencia. Cabe notar que a diferencia de otros combustibles líquidos como la gasolina que es mayormente demandada por el sector transporte, el diésel se consume también en el sector industrial y agroindustrial. Una estimativa del 2016 ejecutada por el Ministerio de Agricultura indica que el 41.4 % del diésel y el 89.5% del fuel-oleo que se consume en el sector industrial (por ejemplo, en calderas, hornos,

¹ Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a las actividades antropogénicas.

cámaras de combustión) podría reemplazarse utilizando combustibles sólidos derivados de agro residuos [4]. Al mismo tiempo, se asevera que en el Ecuador se generan anualmente 18.3×10^6 MT de agro residuos [5].

En este contexto, resulta singularmente paradójico indicar que desde 1970 el gobierno mantiene un esquema que subsidia y recompensa a los usuarios que consumen combustibles líquidos derivados del petróleo como el diésel. Esto pese a que al albor de los datos (ver Figura 1) existe una franca necesidad de desalentar su uso, aún más, considerando que existen recursos endógenos que podrían utilizarse como sustituto, por ejemplo, los agro residuos. De acuerdo con la política energética vigente los usuarios industriales o de servicios que consumen hasta un límite de 1500 galones de diésel al mes se beneficiarán del régimen de “cuantías domésticas”. Por lo tanto, estos usuarios pueden acceder al diésel en cualquier estación de servicio a nivel nacional con un precio preferencial subsidiado. Este beneficio se obtiene previo registro de sus instalaciones -permiso de renovación anual- en la Agencia de Regulación y Control Hidrocarbúrico (ARCH). Por otro lado, aquellos usuarios que superen el umbral de consumo de 1500 galones de diésel por mes están compungidos a adquirir el diésel al precio internacional. Mas sin embargo sus consumos no gravan ningún impuesto adicional. En este contexto, el subsidio que otorga el estado es dinámico, pues corresponde a la diferencia que existe entre el precio internacional del diésel que es variable (5.04 USD/gal a la fecha de elaboración de este informe) y el precio de venta oficial, que está actualmente congelado en todas las estaciones de servicio a nivel nacional en 1.90 USD/gal [6].

A la sombra de esta dicotomía entre la necesidad de reducir el consumo de diésel y el estímulo que los subsidios provocan sobre el consumo, académicos y empresarios tradicionalmente han afirmado que será infructuoso e impracticable cualquier intento de introducir nuevas tecnologías o nuevos biocombustibles que sean capaces de reemplazar al diésel en operaciones agroindustriales, particularmente en aquellos nichos que se benefician de “cuantías domésticas” [7]. Es legítimo entonces acertar que en el mercado energético local existe una competencia “desleal” pues la distorsión del precio del diésel causada por los subsidios impide evaluar asertivamente las ventajas y desventajas de los combustibles alternativos, por norma, más costosos que sus pares de origen fósil [7]–[9]. Con este precedente, presentamos el siguiente informe en el que se detalla la iniciativa gestionada por el Comité Europeo para la Formación y Agricultura CEFA, en la cual ha sido posible -en términos técnicos, ambientales y financieros- reemplazar el diésel subsidiado que se consume en los procesos de secado de café y cacao en cinco centros de acopio administrados por cooperativas de agricultores utilizando una innovadora tecnología de combustión de invención local que utiliza biocombustibles sólidos derivados de agro-residuos como fuente renovable de energía. Acerca de este encargo, se ofrecen mayores detalles y descripciones en las secciones a continuación.

2. Transferencia de tecnología: punto de partida y primeras acciones

La tecnología implementada responde a un desarrollo científico ejecutado por un equipo de profesionales ecuatoriano [10]. Es decir, la sistematización convocada en este informe corresponde a un caso práctico y posiblemente *inérito* en el que en Ecuador una tecnología se ha transferido desde el seno académico -laboratorial- hacia una operación industrial bajo condiciones de carga real provocando significativos impactos económicos, ambientales y sociales en la comunidad y el sector industrial asociado. A este respecto cabe indicar que el contacto entre CEFA y la start-up de base científica “Bioenergía de los Andes BDA” -detentora de la tecnología en cuestión- surge con motivo del Concurso Nacional de Investigación Agroeconómica organizado por el MAGAP en el año 2017. El Dr. Mario A. Heredia S, director tecnológico de BDA obtuvo el segundo lugar en el mencionado concurso precisamente por la divulgación de una novel tecnología y prototipo asociado que permitiría generar energía térmica utilizando agro-residuos como biocombustible sólido para la sustitución del diésel en operaciones industriales [11]. Como parte del reconocimiento recibido por el Dr Mario A Heredia S en este concurso, surge la

oportunidad de visitar los centros de acopio apoyados por CEFA en el marco de los programas JUNTOS (código AID 011.416) y CADENAS (código FOOD/2016/380-060). Así, CEFA financia la visita de un equipo técnico de la start-up de base científica BDA liderado por el Dr Mario A Heredia S para que se evalúe la factibilidad de implementar un piloto/prototipo de esta tecnología en un centro de acopio gestionado por asociaciones de agricultores. Posteriormente, con una inversión conjunta de CEFA y BDA se instala en marzo de 2018 el primer prototipo de esta tecnología en la provincia de Sucumbíos para su monitoreo y evaluación a largo plazo. Para la fecha de elaboración de este informe esta tecnología se ha adaptado y replicado por seis ocasiones en cinco centros de acopio repartidos en las provincias de Sucumbíos, Napo, Orellana y Manabí. Se proporciona a continuación detalles y características sobre este despliegue.

3. Caracterización de las operaciones de secado de café y cacao en los centros de acopio

Durante la visita de campo referida en la Sección 2 y una serie de ellas que se desarrollaron a partir de 2018, se identifica que los centros de acopio de las organizaciones que participan de los programas de CEFA en el norte de la Amazonía recurren a dos métodos de secado, a saber: i) secado solar en marquesinas y ii) secado mecánico. El secado solar está basado en infraestructuras del tipo invernadero conocidas como marquesinas, bajo las cuales los productos a secar se extienden sobre superficies encementadas (Figura 2). En las marquesinas, el proceso de secado recurre como fuente de energía a la radiación solar incidente. Es decir, se trata de infraestructuras de producción de energía renovable del tipo solar dedicadas a la producción de energía térmica para la deshidratación de productos. La Figura 2 muestra las marquesinas de secado solar identificadas en diferentes organizaciones.



Figura 2. Marquesinas para secado solar de granos identificadas en las organizaciones visitadas. En las fotografías: arriba (APROCEL), abajo (PRIMAVERA).

La tipología y características generales de las marquesinas que se muestran en la Figura 2 se replican en los distintos centros de acopio visitados con ciertas variaciones constructivas y tamaños. La Tabla 1 muestra un detalle de las variaciones constructivas identificadas por el equipo científico de BDA en los centros de acopio apoyados por CEFA.

Tabla 1. Detalles y características de cada una de las marquesinas identificadas en los centros de acopio apoyados por CEFA.

Denominación	Símbolo	Características	Imagen
Tipología 1	T1	<ul style="list-style-type: none"> - Marquesina del tipo túnel con aberturas laterales para ventilación natural. - Toda la ventilación se genera por corrientes de viento y por gradientes de densidad en el aire (convección natural). - Esta marquesina representa la configuración típica de un sistema de secado utilizado en el sector rural. 	 
Tipología 2	T2	<ul style="list-style-type: none"> - Marquesina del tipo chimenea. - Esta marquesina cuenta con aberturas laterales para ventilación natural - Además, esta marquesina tiene un traslape en la sección superior configurando un área abierta hacia el ambiente (chimenea) que busca facilitar la renovación del aire interno dentro de la marquesina (ascensión de aire por diferencias de densidad – convección natural). - Toda la ventilación se genera por corrientes de viento y por gradientes de densidad en el aire. - Esta marquesina representa otra de las configuraciones típicas de un sistema de secado utilizado en el sector rural. 	 
Tipología 3	T3	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema híbrido (solar – biocombustible sólido): la T3 tiene vinculado un sistema de generación de energía térmica. - El aire caliente generado en el sistema de generación de energía térmica se inyecta dentro de la marquesina utilizando un ducto de transporte que cuenta con 3 difusores regulables. - Marquesina tipo túnel, cerrada, sin aberturas laterales para ventilación natural. - Una variación de esta tipología prescinde del generador de energía térmica e incorpora únicamente un sistema de ventilación por medios mecánicos, equipa 2 ventiladores de accionamiento eléctrico. 	 
Tipología 4	T4	<ul style="list-style-type: none"> - Marquesina del tipo túnel similar a la T3, pero que cuenta con mesas de secado. - Este tipo de marquesina cuenta con un sistema mecánico de accionamiento manual que permite regular la altura y por ende el área cubierta por las persianas laterales. De este modo, se puede regular el flujo de aire que atraviesa la marquesina. - Adicionalmente este tipo de marquesina cuenta con un dispositivo que permite regular el área disponible en la sección de la chimenea para controlar el flujo convectivo. Este mecanismo es de accionamiento eléctrico. 	 

En las marquesinas descritas en la Tabla 1 la eficiencia del proceso de secado depende de varios factores, entre ellos: las condiciones ambientales en la zona, radiación solar difusa, nubosidad, humedad relativa, presencia de camas de secado, configuración de la marquesina, humedad inicial del producto, procesos de fermentación previos, altura del lecho de secado, etc. El proceso de secado depende además de la orientación geográfica de la marquesina respecto del trayecto que hace el sol, incluyendo zonas de pérdida por sombra y opacidad del plástico utilizado (mantenimiento y polvo depositado, por ejemplo). Es por estos motivos que las marquesinas, en general, requieren un sistema de respaldo mecánico para el secado. Para sobrellevar los inconvenientes de secado observados durante los periodos lluviosos y húmedos se observa que cada una de las asociaciones además de equipar varias marquesinas (hasta siete según observaciones de campo) cuentan también con sistemas de secado mecánico cuya tipología varía del siguiente modo: cama de lecho fijo para secado de 1 y/o 2 niveles y sistema rotativo del tipo guardiola (ver Figura 3). La operación de los sistemas de secado mecánico es particularmente importante durante el periodo invernal, cuando las lluvias, la nubosidad y la elevada humedad en el ambiente dificultan el proceso de deshidratación retrasándolo y promoviendo la formación de hongos. Estos fenómenos afectan en gran medida la calidad y propiedades organolépticas del producto y por ende su precio en el mercado y los ingresos que las asociaciones pueden obtener.



Figura 3. Sistemas de secado mecánico identificados en las organizaciones intervenidas. De izquierda a derecha: Secador de cama y lecho fijo con 2 niveles (secado y pre secado) en la organización APROCEL. Secadora rotativa del tipo guardiola en la organización Primavera Oriental y Secador cama lecho fijo de 1 nivel en Kallari.

En general, la energía térmica -sobre la forma de aire caliente- que se suministra a las instalaciones de secado mecánico se ha producido recurriendo a la combustión de diésel y GLP, ambos subsidiados. Cabe destacar que una condición similar se ha podido observar en otros centros de acopio comunitarios y pertenecientes a privados en las zonas de intervención del programa. Tradicionalmente, las organizaciones de la zona han accedido al diésel con precios preferenciales debido a la política de subsidios vigente en Ecuador (ver “cuantías domésticas” en la Sección 1). Cabe notar que habitualmente estas organizaciones acceden también al GLP con precios preferenciales, más sin embargo de forma irregular, pues el GLP en su presentación de 15kg está exclusivamente destinado y subsidiado para el uso doméstico y residencial. Un inventario de los sistemas de secado artificial identificados en las organizaciones intervenidas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Inventario de sistemas de secado artificial en las organizaciones intervenidas.

Organización	Secador rotativo (guardiola) (u)	Secador cama de lecho fijo de 2 niveles (secado y pre secado) (u)	Secador cama de lecho fijo de 1 nivel (u)
APROCEL	n.d	1	n.d
APROCCE	1	1	n.d
PRIMAVERA	1	1	n.d
ASOMACHE	n.d	n.d	1
KALLARI	n.d	n.d	1

nd = no dispone.

Sobre la base de los sistemas mecánicos de secado existentes (Tabla 2) CEFA y BDA han implementado modernos sistemas de combustión que actualmente les permiten a las asociaciones generar la energía térmica consumida en los procesos de secado de café y cacao utilizando agro-residuos como biocombustible sólido. De este modo, se ha dispensado el consumo de diésel en las asociaciones otorgándoles independencia sobre los vaivenes de la política energética nacional que constantemente amenaza con la revisión y retiro de subsidios. Es importante destacar que la tecnología de combustión implementada se adaptó a los secadores preexistentes preservando la funcionalidad y disposición de los mismos y disminuyendo los costos de inversión inicial y adquisición de nueva maquinaria. De este modo se ha consolidado en los centros de acopio intervenidos un modelo de producción que recurre en su totalidad a fuentes de energía renovables, a saber: solar, biocombustibles y electricidad. Esto por cuanto la electricidad que se consume en los centros de acopio para las actividades administrativas y productivas, provendría de fuentes hidroeléctricas (92%) [3].

4. Configuración del sistema de generación de energía térmica.

En la Figura 4 se proporciona una representación general del sistema de secado que se utiliza en las organizaciones de agricultores intervenidas. En general, el calor para el proceso se puede producir a través de la combustión de diésel, GLP o biocombustibles (ítem 1, Figura 4). El frente de llama generado por la combustión se expande dentro de un intercambiador de calor (ítem 3, Figura 4). Este intercambiador tiene la misión de calentar el aire que se va a inyectar al secador impidiendo que tome contacto con los gases de combustión. Los gases de combustión se descargan al ambiente por medio de una chimenea (ítem 2, Figura 4). De este modo, se asegura que el aire que se suministra al secador está completamente limpio y libre de cualquier contaminante. El aire que se suministra al secador se conduce hacia la cámara de secado pasando previamente por el intercambiador de calor por medio de una turbina de accionamiento eléctrico (ítem 5, Figura 4). La entrada a la cámara de secado corresponde al ítem 7 en la Figura 4.



Figura 4. Sistema de combustión de agro-residuos de lecho fijo y propagación de llama horizontal instalado en APROCCE y PRIMAVERA. 1. Tolva de almacenamiento, 2. Ducto evacuación de gases de combustión, 3. Intercambiador de calor, 4. Compuerta de inspección, 5. Soplador industrial, 6. Secadora rotativa tipo guardiola, 7. Secadora de cama fija en 2 niveles, 8. Tablero de control automático, 9. Compuerta de evacuación de ceniza.

Es importante indicar que el sistema de generación de energía térmica renovable que utiliza biocombustibles sólidos derivados de agro residuos se ha adaptado al secador utilizando el mismo intercambiador de calor y cámara de combustión que previamente albergaba al quemador de diésel. De esta manera, se han evitado costosas adaptaciones y desarrollos complementarios de dispositivos para permuta de calor. Así mismo, se mantiene la posibilidad de acoplar un quemador de diésel como respaldo para eventos de emergencia o mantenimiento. La potencia térmica del quemador de biocombustible ($120 \text{ kW}_{\text{th}}$) es equivalente a la potencia térmica generada por el quemador de diésel. El consumo del quemador de diésel depende de su configuración y calibración interna, por ejemplo, presión de inyección y calibre de la boquilla. En las organizaciones intervenidas, se ha verificado que el consumo estimado del quemador de diésel estaba entre 3 y 6 galones por hora de acuerdo con su placa de identificación. Afirman los operadores que, luego del reemplazo de tecnología el proceso de secado se lleva a cabo sin observarse desvíos en la temperatura del aire que se inyecta al secador en comparación con el sistema que antiguamente utilizaba diésel.

Es pertinente indicar que la operación del quemador de biocombustible se encuentra completamente automatizada. El arranque y puesta en marcha del sistema es completamente automático y se puede manipular y comandar desde un tablero de control industrial que cuenta con una pantalla monocromática como interfaz de usuario (ítem 7, Figura 4). La operación, control y monitoreo del quemador de biocombustible se realiza también de forma automática, siendo que a través de la interfaz de usuario se pueden parametrizar las temperaturas de secado que se desea alcanzar. La interfaz de usuario muestra continuamente el número de horas de operación del sistema de secado. La descarga de cenizas y el apagado del quemador también se realiza de forma automática desde el mismo tablero de control. En este sentido, las funcionalidades, ajustes y sistemas de control asociados al quemador de biocombustible son superiores a las equipadas en el quemador de diésel. El quemador de biocombustible cuenta con una tolva de almacenamiento en la que se almacena biocombustible para la operación cotidiana (ver Figura 4). Las observaciones de campo confirman que con la tolva llena es posible alcanzar una autonomía aproximada de entre 8 y 12 horas de operación continua.

5. Organizaciones de agricultores intervenidas

Entre el año 2018 y 2021 se instalaron progresivamente seis sistemas de generación de energía térmica renovable que recurren a biocombustibles sólidos derivados de agro residuos en cinco organizaciones de productores de café y cacao ubicadas en el norte de la Amazonía del Ecuador y la provincia de Manabí. La Tabla 3 muestra las cinco organizaciones de productores de café y cacao intervenidas con esta tecnología. Se muestra su ubicación geográfica determinada por un dispositivo GPS, la fecha en que se implementó la tecnología, el modelo de quemador implementado y el biocombustible que se utiliza. Como se puede notar, cuatro organizaciones -APROCCE, Primavera, ASOMACHE y KALLARI- utilizan cuesco de palma africana como biocombustible sólido mientras que la organización APROCEL trabaja en régimen de co-combustión. Es decir, además de cuesco de palma africana en APROCEL se utilizan también las cascarillas de café generadas en el centro de acopio durante el proceso de trilla de café robusta.

Es importante notar que en ciertas organizaciones el sistema de generación de energía térmica se acopló a un sistema de distribución de energía térmica que permite suministrar aire caliente a dos sistemas de secado, a saber: un secador de cama fija de dos niveles y a una guardiola rotativa (ver caso APROCCE y PRIMAVERA en la Tabla 2). En estos casos, el sistema de distribución de energía térmica permite seleccionar de forma manual a través de una válvula de compuerta el tipo de secador que se desea utilizar. Cabe destacar que, en ciertas organizaciones, la operación del secador mecánico está vinculada al uso de un motogenerador a diésel (Baifa C40-60). La falta de un suministro de electricidad apropiado ha obligado a que organizaciones como APROCCE y PRIMAVERA se vean en la necesidad de accionar un motogenerador desde el cual se genera la electricidad que consume la turbina del secador. En el caso de la organización Primavera, ha sido posible reemplazar la turbina antigua que equipaba un motor de 10HP por una turbina de alta eficiencia que otorga el mismo flujo

volumétrico de aire con un motor de 5HP. Esta intervención de eficiencia energética le ha permitido a esta organización en particular prescindir del consumo de diésel en el motogenerador para las operaciones de secado, además de haber reemplazado el consumo de diésel en el quemador del secador. Para el caso de APROCCE; se ha verificado que recientemente el programa PROAMAZONIA ha dotado de un nuevo transformador al centro de acopio, de tal modo que la turbina del secador ahora recibe electricidad desde el sistema interconectado nacional. Para este caso, APROCCE se ha beneficiado del incremento de eficiencia y ahorro que implica el reemplazar una turbina que equipa un motor de 10 HP por una turbina de alta eficiencia que entrega el mismo flujo volumétrico con un motor de 5 HP. En este caso, se estima el ahorro en la tarifa de electricidad alcanza 1.09 USD por cada hora de operación del secador.

Tabla 3. Tecnologías de combustión implementada en las organizaciones intervenidas por el programa JUNTOS y CADENAS de CEFA.

Organización	Tecnología de combustión	Biocombustible	Capacidad Secador	Implementación	Ubicación (GPS)
KALLARI	Lecho fijo, propagación de llama horizontal	^a Cuesco de palma africana	Cama horizontal (10x3 – 120 qq)	08.11.19	1°02'46.0"S 77°42'47.6"W
ASOMACHE			Cama horizontal (6x2.4 – 60 qq)	11.08.21	0°13'38.07"N 79°53'7.954 W
PRIMAVERA			Secador 2 niveles (6.4x2 – 120qq) + guardiola	15.02.20	0°05'02.0"S 76°38'27.7"W
APROCCE			Secador 2 niveles (6.4x2 – 120qq) + guardiola	15.02.20	0°01'48.5"S 76°53'08.9"W
APROCEL 1	Lecho fijo, propagación de llama vertical	Mezcla 1:1 p/p cuesco de palma africana y ^b cascarilla de café	Secador 2 niveles (6.4x2 – 120qq)	13.04.18	0°09'21.1"N 76°50'47.8"W
APROCEL 2	Lecho móvil, propagación de llama horizontal	Mezcla 1:1 p/p cuesco de palma africana y cascarilla de café	Sistema de secado experimental en marquesina	16.07.19	

^a Poder calorífico inferior del cuesco de palma referencial 17 MJ/kg;. ^b Poder calorífico inferior de la cascarilla de café referencial 13 MJ/kg. Humedad referencial del biocombustible según manual del fabricante de los sistemas de combustión: 15 % p/p _{bs} (ver Anexo 1).

6. Tecnologías de combustión implementadas

Como se muestra en la Tabla 3, se han implementado tres prototipos diferentes en búsqueda de la mejor configuración tecnológica posible y de que se cumplan con las aspiraciones de las asociaciones. La tecnología de combustión más replicada es la del tipo lecho fijo y propagación de llama horizontal implementada en KALLARI, APROCCE, PRIMAVERA y ASOMACHE. Este tipo de tecnología utiliza cuesco de palma africana seco y sin sal como biocombustible sólido. En contrapartida, APROCEL cuenta con dos sistemas de combustión peculiares pues responden a la aspiración de la organización de utilizar sus propios residuos, es decir, la cascarilla de café, como fuente de energía para los procesos de secado mecánico. Por lo tanto, en APROCEL los quemadores implementados permiten la combustión de cascarilla de café. Esta configuración ha representado un desafío tecnológico y técnico superlativo pues la bibliografía disponible reporta que la utilización de cascarilla de café sin pretratamiento y tal como se encuentra disponible luego del proceso de trillado, da como resultado bajas temperaturas en el secador y elevadas emisiones de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no combustionados [12], [13]. El equipo técnico y científico de BDA ha compensado parcialmente esta deficiencia agregando cuesco de palma a la formulación del biocombustible que se utiliza en el quemador en una proporción de 1:4 %v, por lo tanto, operando el quemador en régimen de co-combustión. No obstante, es importante que se destaque el esfuerzo de ingeniería desplegado por el equipo de investigación de BDA a manera de co-inversión que dio luz a ciertos avances tecnológicos que permiten que este tipo de quemador tenga un rendimiento práctico similar al de un quemador de diésel, pues en APROCEL se alcanzan las mismas temperaturas de secado con ambos vectores energéticos. En todos los casos, esta funcionalidad y rendimiento se ha alcanzado sin haber alterado ni el volumen ni el diseño del intercambiador de calor, es decir con la menor inversión posible. Sin lugar a duda, este tipo de avances científicos y de ingeniería ejecutados a favor de las organizaciones constituyen un caso que amerita su mayor estudio, réplica y divulgación. A continuación, se describe con mayor detalle las configuraciones tecnológicas implementadas en las organizaciones que se muestran en la Tabla 3.

6.1. Quemador de lecho fijo y propagación de llama horizontal

Los quemadores de lecho fijo y propagación de llama horizontal implementados en KALLARI, APROCCE, Primavera y ASOMACHE operan sobre la misma plataforma tecnológica. Es decir, se trata de una cámara de combustión en la que se desarrolla el proceso termoquímico mediante la dosificación estequiométrica de aire en al menos tres etapas. El tipo de quemador implementado en estas organizaciones cuenta con investigaciones científicas de respaldo publicadas por el equipo científico y de ingeniería de la start-up ecuatoriana BDA [14], [15]. Una representación esquemática del quemador de cuesco de palma se presenta en la Figura 5.

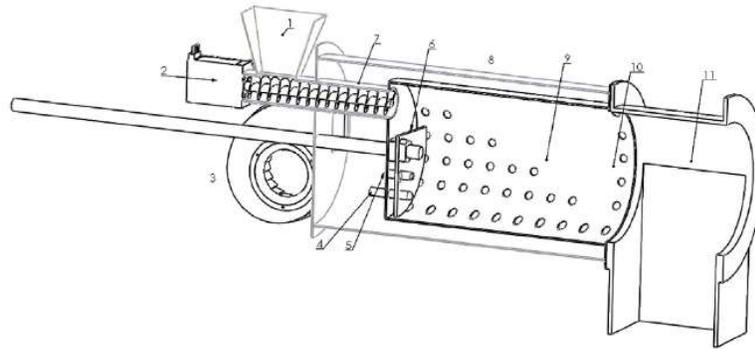


Figura 5. Esquema general del sistema de combustión de cuesco de palma africana, con lecho fijo y propagación de llama horizontal. 1 Tolva de alimentación, 2. Alimentador de biomasa, 3. Ventilador centrífugo, 4. Dispositivo de encendido, 5. Sensor de flama, 6. Deflector para ceniza, 7. Mecanismo sin fin, 8. Bastidor, 9. Lecho fijo, 10. Inyectores de aire, 11. Descarga de ceniza.

En general, el biocombustible es transportado desde la tolva hacia la cámara de combustión por un mecanismo helicoidal con deformación elástica (ítem 2, Figura 5). En la cámara de combustión (ítem 9, Figura 5) existe un sistema de reacción utilizado para el arranque en frío del quemador que está comandado electrónicamente y que tiene la función de desencadenar el proceso de combustión (ítem 4, Figura 5). Así mismo se dispone de un mecanismo para la remoción de cenizas de activación cíclica programable (ítem 6, Figura 5). Complementariamente el aire para la combustión es dosificado a través de un ventilador centrifugo (ítem 3, Figura 5) acoplado al bastidor central del quemador. El caudal de este ventilador se ajusta mediante el sistema de control electrónico para garantizar la estequiometría apropiada para cada condición de operación. La Figura 6 muestra en general la vista y disposición del quemador de lecho fijo y propagación de llama horizontal descrito en esta sección. Cade además indicar que previo a la integración del quemador con el sistema de secado, el equipo técnico de BDA repotenció todos los intercambiadores de calor fijando apropiadamente las aletas de transferencia, colocando deflectores para manejar tiempos de residencia del efluente, instalando refuerzos en la zona de expansión de la llama, colocando una capa de aislamiento térmico (lana de roca) de 5 cm de espesor y reemplazando el ducto de descarga del efluente por uno elaborado en acero inoxidable sin curvas que superen los 45°.



Figura 6. Sistema de combustión de lecho fijo y propagación de llama vertical instalado en las asociaciones KALLARI, APROCCE, ASOMACHE y PRIMAVERA.

6.2 Sistema de combustión de lecho fijo y propagación de llama vertical

El sistema de combustión de lecho fijo y propagación de llama vertical implementado en APROCEL es capaz de operar utilizando mezclas de cuesco de palma africana con cascarilla de café en una proporción de 1:1 p/p. Para efectos operativos se puede también considerar la relación de mezcla equivalente en volumen, que es de 4:1 %v/v. Por ejemplo, para la operación de este tipo de quemador el operador debe mezclar 4 carretillas de cascarilla de café por cada carretilla de cuesco de palma africana. A diferencia del quemador descrito en la Sección 6.1., el sistema de combustión implementado en APROCEL dispone de un mecanismo de agitación mecánico instalado en la tolva de combustible que facilita un suministro de cascarilla estable hacia la cámara de combustión. Esto para prevenir intermitencias en el frente de llama provocados por la baja densidad aparente de la cascarilla de café y sus precarias propiedades de transporte y arrastre mecánico. Cabe aclarar que todos los esfuerzos de investigación, diseño, construcción y puesta en marcha de este sistema de combustión se los atribuye el equipo de investigación de la start-up BDA. Así mismo, el cálculo estequiométrico y diseño de mezclas de biocombustibles para garantizar la operación a conformidad de la organización fueron responsabilidad de BDA. CEFA como contraparte ha facilitado el tramo de financiamiento correspondiente a los materiales para la construcción del prototipo y los mantenimientos preventivos/correctivos. La Figura 7 muestra un esquema representativo del quemador de lecho fijo y propagación de llama vertical instalado en APROCEL.

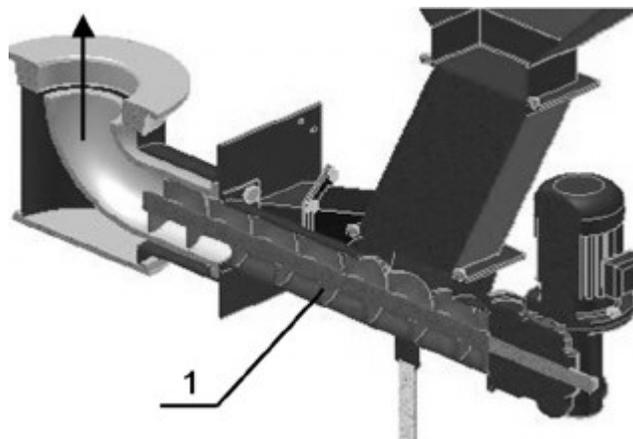


Figura 7. Esquema representativo del sistema de combustión de lecho fijo y propagación de llama vertical.

En este prototipo, la mezcla de combustibles (cascarilla de café y cuesco de palma africana) es transportada desde la tolva de almacenamiento hacia el lecho de combustión por medio de un mecanismo sinfín. Es importante notar que las dimensiones del mecanismo que transporta el biocombustible hacia la cámara de combustión en el quemador de APROCEL es significativamente mayor que el observado en el quemador descrito en la Sección 6.1. Esta diferencia se atribuye a la necesidad de trabajar en régimen de co-combustión utilizando cascarilla de café y cuesco de palma africana como combustibles. Se debe notar que en este tipo de quemador el mecanismo de descarga de cenizas no es automático. Según las observaciones de campo, el operador del secador debe descargar las cenizas acumuladas en el lecho de combustión en intervalos de aproximadamente 45-60 minutos. De igual manera, este tipo de quemador no dispone de un mecanismo de encendido automático. El proceso de combustión tiene que ser iniciado por el operador del sistema de secado utilizando un material inflamable que desencadena el proceso de combustión en el lecho. Posteriormente el aire se suministra hacia el lecho de combustión por medio de un ventilador axial de paletas montado sobre el bastidor del quemador y un conjunto de inyectores

desmontables distribuidos sobre el perímetro del lecho de combustión. El diseño y ubicación de los inyectores y en general del sistema de dosificación de aire en tres etapas corresponde y es contribución de la start-up BDA.

Luego de que el sistema de combustión se ha encendido, la operación se torna automática y está comandada desde un tablero de control industrial. Desde el tablero se controla el accionamiento y sentido de giro del alimentador de biomasa y el accionamiento del ventilador además de que se registran el número total de horas de funcionamiento del sistema. Es destacable indicar que este primer sistema de combustión se elaboró en 2018 a manera de prototipo. Sin embargo, al momento de la elaboración del informe este se encuentra aún en operación. El sistema de combustión de lecho fijo y propagación de llama horizontal se encuentra acoplado al intercambiador de calor y cámara de combustión original del secador. Es pertinente notar la particularidad de que este sistema de generación de energía térmica mantiene el quemador de diésel como respaldo, en caso de que se presenten averías en el sistema de combustión que utiliza biocombustible. Por lo tanto, el sistema de combustión de lecho fijo y propagación de llama vertical instalado en APROCEL tiene una característica dual, es decir, la energía térmica puede ser generada recurriendo a combustibles fósiles (diésel) y biocombustibles de origen renovable (cuesco de palma y cascarilla de café). Sin duda, esta es otra de las características e innovaciones conducidas y ejecutadas por BDA que merecen apropiada divulgación pues constituyen configuraciones tecnológicas inéditas en el sector conseguidas sobre la base de inversiones y esfuerzos continuados. La Figura 8 muestra un detalle general del sistema de generación de energía térmica instalado en APROCEL y que suministra aire caliente a un secador de cama fija en dos niveles. Vale la pena indicar que este secador, no recibió financiamiento para instalar una capa de aislamiento térmico a su intercambiador de calor, condición indispensable para garantizar una operación sin pérdidas innecesarias de calor hacia el ambiente.



Figura 8. Sistema de combustión de lecho fijo y propagación de llama vertical instalado en APROCEL.

6.3 Sistema de combustión de lecho móvil y propagación de llama horizontal

Además del sistema de combustión descrito en la Sección 6.2, APROCEL cuenta también con un sistema de combustión de lecho móvil y propagación de llama horizontal prototipo. Este sistema de lecho móvil opera también con cuesco de palma africana y permite mezclas con cascarilla de café (1:1 p/p). La movilidad del lecho facilita la descarga de cenizas, las que se evacuan automáticamente a medida que el lecho recircula. A diferencia del quemador descrito en la Sección 6.2, el lecho móvil dispone también de un mecanismo de encendido automático que se acciona desde el tablero de control. El tablero de control electrónico cuenta con una pantalla monocromática como interfaz de usuario y permite encender, operar y apagar el quemador. Se registran también las horas de operación además de que se monitorean constantemente el movimiento del lecho y la alimentación

de biocombustible hacia la tolva de almacenamiento mediante sensores. Es importante indicar que el sistema de combustión de lecho móvil cuenta con 2 tolvas de almacenamiento de biocombustible. La tolva primaria permite la operación del sistema de combustión durante 24 horas continuas. La tolva primaria cuenta con un mecanismo agitador y un alimentador de tornillo que transporta el biocombustible hacia la tolva secundaria. La tolva secundaria, de menor capacidad volumétrica, está directamente asociada al quemador de lecho móvil. Por lo tanto, suministra el combustible que por arrastre del lecho es transportado hacia la cámara de combustión. El aire para el proceso de combustión se suministra por medio de un ventilador centrífugo atravesando el lecho. De esta manera, el aire de combustión es también utilizado para refrigerar el tren de rodaje que mueve el lecho. La Figura 9 muestra el sistema de combustión de lecho móvil instalado en APROCEL.



Figura 9. Sistema de combustión de lecho móvil y propagación de llama horizontal instalado en APROCEL.

El sistema de combustión de lecho móvil está instalado en la cámara de combustión e intercambiador de calor que anteriormente albergaba un quemador de diésel. El intercambiador de calor se repotenció re-soldando las aletas de transferencia, colocando deflectores para manejar tiempos de residencia, instalando refuerzos en la zona de expansión de la llama y colocando una capa de aislamiento térmico (lana de roca) de 5 cm de espesor. A su vez, el conjunto de generación de energía térmica está acoplado a una manga de distribución que conduce aire caliente hacia un sistema de difusores instalado dentro de una marquesina. Un esquema general de operación del sistema de combustión de lecho móvil y propagación de llama horizontal se puede consultar en la Figura 10.

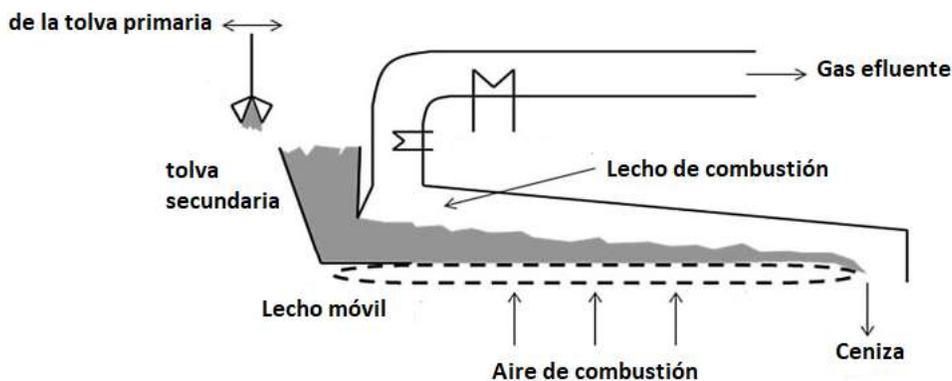


Figura 10. Representación esquemática del sistema de combustión de lecho móvil y propagación de llama horizontal instalado en APROCEL.

7. Manuales de operación y mantenimiento: material de capacitación y entrenamiento

Conforme se describe en la Sección 6, existen tres tipos de tecnologías de combustión implementadas en las diferentes organizaciones. Es importante indicar que la start-up de base científica BDA, como parte de su inversión, ha desarrollado y provisto de un detallado y completo manual de operación y servicios a cada organización intervenida, tanto en versiones impresas como en versiones digitales de descarga y reproducción ilimitada. Naturalmente, existen diferencias entre los manuales provistos que corresponden a diferencias en el tipo de tecnología implementado (ver Tabla 3). No obstante, es importante notar que para los proyectos implementados sobre la base del quemador de lecho fijo y propagación de llama vertical existen también ligeras diferencias entre los manuales de operación entregados. Estas diferencias tienen que ver con el manejo y manipulación principalmente de la interfaz de usuario. Naturalmente, cada proyecto implementado y la experiencia que se ha ido acumulado le ha permitido a BDA invertir decididamente en la integración de ajustes y mejoras a sus modelos de sistemas de combustión, tanto a nivel de usuario, como a nivel de software y hardware contando además con el robustecimiento y *upgrade* de dispositivos y componentes que constituyen el quemador. En este sentido, la Tabla 4 presenta a manera de base de datos vínculos de acceso hacia todos los manuales concebidos, diagramados, editados e impresos por BDA para su uso y consulta en las organizaciones.

Tabla 4. Inventario de manuales y videos de operación y servicio de los sistemas de secado implementados.

Organización	Manual	Videos
APROCEL 1	Vínculo de acceso privado	Video 1
APROCEL 2	Vínculo de acceso privado	Video 1 Video 2 Video 3 Video 4
APROCCE	Vínculo de acceso privado	Video 1
PRIMAVERA	Vínculo de acceso privado	Video 1 Video 2 Video 3 Video 4 Video 5 Video 6
KALLARI	Vínculo de acceso privado	Video 1 Video 2 Video 3 Video 4 Video 5 Video 6 Video 7 Video 8
ASOMACHE	Vínculo de acceso privado	Video 1 Video 2 Video 3 Video 4 Video 5 Video 6 Video 7

Los manuales recogidos en la Tabla 4 describen escrupulosamente con gráficos y esquemas todos los protocolos y procedimientos asociados a la operación del quemador (encendido, apagado, descarga de cenizas, selección de

temperaturas, etc). Así mismo, se detallan las tareas de mantenimiento preventivo e inspecciones periódicas que deben realizarse en el quemador y sus dispositivos. Se indican además las recomendaciones de instalación del quemador en campo, la calidad del combustible que el quemador demanda y los protocolos de seguridad industrial que deben observarse. Se instruye también sobre procesos de diagnóstico de fallas elementales que pueden y deben ser ejecutados por los operadores. Alternativamente, BDA también ha invertido en la elaboración de videos que aclaren los principales procedimientos de encendido, apagado, descarga de cenizas e inspecciones operacionales habituales, que se encuentran disponibles en YouTube y cuyos vínculos de acceso se han divulgado apropiadamente con las organizaciones y con el personal técnico y administrativo de CEFA. La Tabla 4 recoge y sistematiza también estos aportes audiovisuales de apoyo y soporte a las organizaciones.

Cabe destacar además que el equipo técnico de BDA ha provisto de servicios de capacitación en campo a las organizaciones sobre el correcto uso y manipulación del quemador. Desde el arranque del primer proyecto en 2018 BDA ejecuta un protocolo de entrega de maquinaria que contempla tres procesos: i) instalación del quemador en campo, ii) puesta en marcha y pruebas de funcionamiento, y iii) entrega técnica y capacitación a operadores. Este protocolo sigue las normas y recomendaciones internacionales de fabricantes de maquinaria industrial que garantizan un adecuado uso y manipulación de los equipos, en atención a las garantías establecidas. BDA se ha ocupado y ha invertido en el despliegue de su equipo técnico para asegurarse de que estas tareas se cumplan en campo por sobre cualquier limitación de desplazamiento o acceso hacia las zonas en que se han implementado los proyectos.

Adicionalmente, BDA ha provisto bajo el auspicio de CEFA un curso completo teórico-práctico de 2 días en campo, en el que se ha instruido con total detalle a los operadores de las organizaciones sobre el correcto uso, manipulación y mantenimiento de todos los sistemas de combustión implementados en el ámbito de estos proyectos. BDA proporcionó materiales didácticos, maquetas demostrativas para que los asistentes puedan conocer y capacitarse en todas las tareas vinculadas al quemador, inclusive, más allá de la operación, facilitando también instrucciones para ejecución de mantenimientos preventivos y correctivos. Como parte de esta capacitación se destinó un día completo a la ejecución de prácticas de campo en un quemador de una asociación. La Figura 11 muestra un registro y prueba documental de la ejecución del taller de capacitación y entrenamiento a operadores ejecutado en el mes de diciembre del año 2020 en el centro de acopio de la organización PRIMAVERA en Orellana.





Figura 11. Acciones de capacitación y entrenamiento ejecutadas por BDA en campo para entrenar a los operadores y técnicos de CEFA sobre el uso y manipulación apropiada de los sistemas de generación de energía térmica, y sobre los principales protocolos de mantenimiento preventivo y correctivo.

Es pertinente también indicar que BDA ha montado una estructura y plataforma de atención de postventa, que incluye la atención de mantenimientos preventivos -indispensables para honrar cualquier garantía- y mantenimientos correctivos que inevitablemente surgen durante la operación. BDA ha desplazado sin excusas su personal técnico por todo el territorio junto con todas las herramientas, insumos y repuestos necesarios para ejecutar las reparaciones y demandas de servicio presentadas desde la implementación del primer proyecto en 2018 y hasta la fecha de elaboración de este informe. Sin embargo, es con cierto desencanto que se notifica que las organizaciones, en su totalidad, han recusado la responsabilidad de ejecutar y destinar los recursos financieros necesarios para la provisión de los mantenimientos preventivos. Las teorías más básicas del mantenimiento industrial claramente reconocen la vital importancia de la ejecución de un plan de mantenimiento preventivo que permita mantener en operación y buen estado las maquinarias. A este respecto, las organizaciones beneficiadas han negligenciado conscientemente esta responsabilidad poniendo en grave riesgo la integridad de los sistemas implementados. Ha sido CEFA quien ha corrido en la totalidad de los eventos y con los gastos derivados de los mantenimientos correctivos y preventivos. Así mismo, ha sido CEFA que en la totalidad de los casos se ha encargado de los costos financieros y gestión logística para el aprovisionamiento de biocombustible sólido a las organizaciones. BDA ratifica de este modo su posición frente a este delicado tema, indicando con la mayor de las claridades que el mantenimiento preventivo de los quemadores, que se deberá ejecutar cada 250 horas de operación o 4 meses (lo que primero ocurra), es una condición irremplazable e inexcusable, para que los sistemas implementados puedan operar con fiabilidad y eficiencia y para que las garantías se encuentren vigentes.

8. Protocolos y metodologías desarrolladas para el análisis de la tecnología en campo

Como parte del encargo de transferir su tecnología de combustión y refinamiento térmico de agro residuos, el equipo científico de BDA diseñó una metodología específica para la ejecución de ensayos de combustión en campo que permitan evaluar la eficiencia de la tecnología implementada, el impacto ambiental in situ que provocan las emisiones del quemador hacia la atmósfera y la factibilidad de utilizar otro tipo de biocombustibles sólidos en las mismas infraestructuras de secado. Esta metodología permite evaluar racionalmente el desempeño de los biocombustibles sólidos utilizados (por ejemplo, cáscara de palma africana y cascarilla de café) y otras variedades de biocombustibles también desarrollados por BDA como parte de sus iniciativas científicas, a saber: i) pellets de fibra de mesocarpio y ii) pellets de cascarilla de café. Para mayores informaciones sobre los sistemas de combustión implementados en campo consulte la Sección 6.

Para estudiar el desempeño de los sistemas de combustión implementados se definieron tres instancias de análisis, a saber: i) pruebas de transporte y alimentación, ii) pruebas de arranque en frío y iii) pruebas de combustión en estado estacionario. De este modo se evalúa el desempeño de los quemadores y los biocombustibles sólidos derivados de agro residuos en todo el espectro operativo de un sistema de secado. El protocolo metodológico que ha guiado la ejecución de las diferentes campañas experimentales ejecutadas en campo por el equipo científico de BDA a lo largo de los años de implementación de la tecnología se expone en la Tabla 5.

Tabla 5. Métodos utilizados por el equipo científico de BDA para evaluar el uso de biocombustibles sólidos derivados de agro residuos en sistemas de combustión vinculados a secadores de grano.

Instancias de análisis y estudio	Descripción
Pruebas de transporte y alimentación	Ensayos que permiten evaluar las propiedades mecánicas y de transporte del nuevo biocombustible para determinar si efectivamente puede almacenarse en la tolva del quemador y si los sistemas de alimentación del quemador tienen la morfología y potencia suficientes para transportarlo bajo condiciones estables desde la tolva hacia la cámara de combustión. Así mismo, se evalúa el comportamiento del biocombustible en la tolva y la potencial necesidad de instalar agitadores en caso de que la densidad no sea la apropiada y el biocombustible no descienda espontáneamente hacia la zona de arrastre del sistema de alimentación del quemador.
Pruebas de arranque en frío	Permiten caracterizar el comportamiento de un biocombustible sólido cuando se encuentra dentro de una cámara de combustión a temperatura ambiente y su progresivo aumento de temperatura hasta alcanzar la temperatura de auto ignición. Este proceso corresponde a la etapa de arranque en frío del quemador, es decir, cuando el operador enciende el quemador para iniciar una operación de secado después de haber permanecido apagado por un periodo de al menos 72 horas. El quemador generalmente dispone de un sistema de arranque automático, que suministra calor por efecto joule e incandescencia a un lecho de combustión de arranque de entre 200-250 g. Este suministro de calor eleva la temperatura de este lecho de arranque desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de auto ignición. Cuando la mayoría de las partículas en el lecho de arranque han alcanzado la temperatura de auto ignición un micro frente de llama se establece sobre la superficie del lecho de arranque. Una vez que este micro frente de llama se estabiliza sobre el lecho de arranque en plena incandescencia y que para ese instante tiene una distribución de temperaturas uniforme, el quemador tiene la capacidad de hacer transición hacia el modo de potencia de sostenimiento (ralenty) y posteriormente, el modo de plena potencia (carga máxima)
Pruebas de combustión en estado estacionario	Para la determinación de temperaturas de proceso y de la composición del efluente (CO, CO ₂ , HC, NO ₂ y O ₂) el equipo consultor consolida una infraestructura de monitoreo cuya descripción se detallará en la sección subsiguiente. No obstante, es importante indicar que los muestreos de temperatura y de composición del efluente gaseoso se registraron únicamente cuando el quemador se encuentra en estado estacionario, es decir una vez que se han ejecutado las instancias 1 y 2 de la presente Tabla. En general, luego del proceso de arranque en frío el quemador pasa al modo de potencia de sostenimiento. Durante la etapa de potencia de sostenimiento el quemador empieza a alimentar biocombustible hacia la cámara de combustión de forma continua y permanente a una tasa que proporciona un flujo másico de entre 5 y 12 kg/h. En esta etapa el quemador estabiliza completamente el frente de llama y lo proyecta a través del cañón. Así, todas las componentes del sistema (cañón del quemador, bastidor de soporte y el espejo de la llama en el intercambiador de calor) adquieren temperatura de trabajo. A medida que avanza este proceso las emisiones observadas durante el proceso de arranque en frío disminuyen paulatinamente hasta tornarse imperceptibles en el tubo de escape. En este instante, el quemador se encuentra listo para entrar al modo de plena potencia o carga máxima. En el modo de plena potencia, el quemador eroga la energía necesaria para calentar el intercambiador de calor y el aire que se suministra al secador hasta la temperatura definida en el tablero de operación (temperatura objetivo). Cuando el quemador no alcanza la temperatura objetivo (o ésta es más alta en relación con la potencia total del sistema) el quemador permanece en plena carga. Para esta circunstancia, las temperaturas en los puntos de muestreo se estabilizan y es posible afirmar que el quemador se encuentra en estado estacionario. El muestreo del efluente se realiza únicamente cuando el quemador se encuentra en estado estacionario siguiendo la norma europea EU 2015/1188-89 L193/76-100.

8.1. Instrumentación desarrollada por BDA para el análisis experimental y monitoreo de la tecnología en campo

Ante la ausencia de una normativa local de emisiones para sistemas de conversión energética de pequeña escala que utilizan biocombustibles sólidos, todo el monitoreo y análisis de la composición del efluente gaseoso en campo se ejecutó siguiendo la normativa de ecodiseño y emisiones europea EU 2015/1188-89 L193/76-100. Para ello el equipo científico de BDA implementó con presupuesto propio una infraestructura experimental itinerante que se desplazó entre los centros de acopio de las diferentes organizaciones beneficiadas. Un esquema general que

muestra la infraestructura experimental montada para el muestreo de la composición del gas efluente y las temperaturas vinculadas a la combustión de biocombustibles sólidos derivados de agro residuos se puede consultar en la Figura 12.

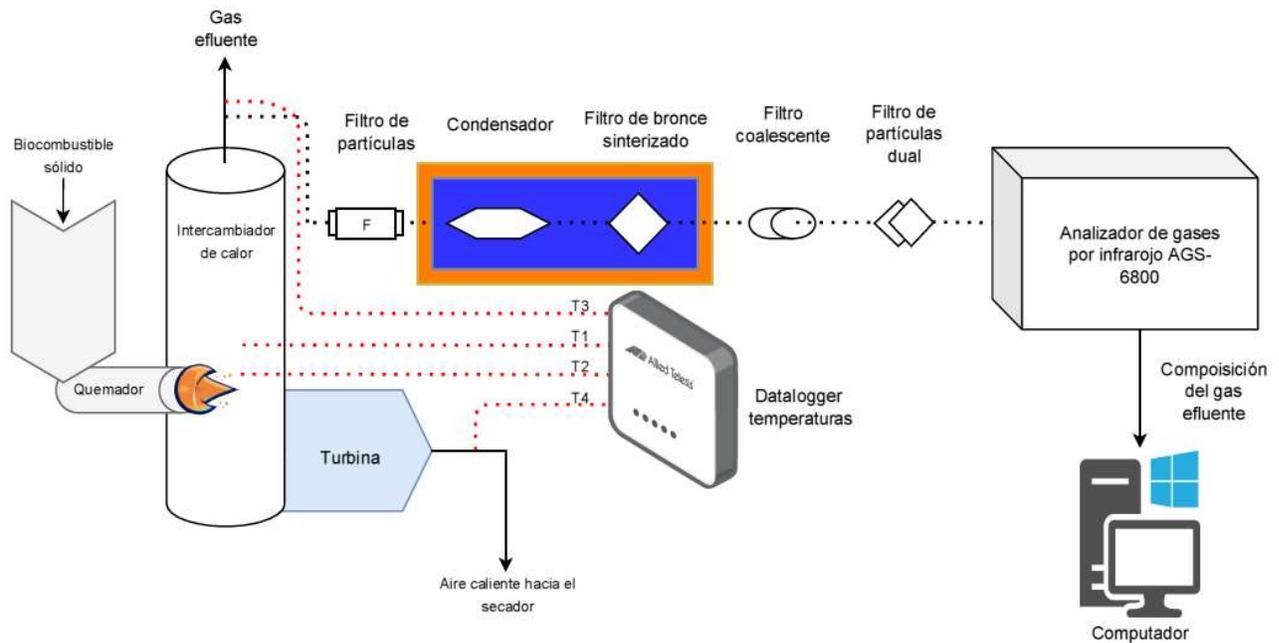


Figura 12. Diagrama explicativo de la línea de muestreo y los procesos de acondicionamiento del gas efluente implementado durante los experimentos de combustión en estado estacionario utilizando biocombustibles sólidos derivados de agro-residuos en quemadores de lecho fijo con propagación de llama horizontal (LFH) y lecho fijo con propagación de llama vertical (LFV). El diagrama muestra además el sistema de monitoreo y almacenamiento de temperaturas en 4 puntos del sistema de secado.

La Figura 12 muestra el punto de instalación de la boquilla de succión del analizador de gases en la chimenea de descarga del gas efluente. Se muestra también el sistema de acondicionamiento del gas efluente. El analizador de gases empleado utiliza un cuerpo de sensores por infrarrojo del modelo AGS-688 de la firma italiana BrainBee. En los estudios experimentales en campo el gas efluente se muestrea en la chimenea de descarga a una distancia de 45 cm desde la base del ducto de salida del intercambiador de calor. El acondicionamiento del gas efluente considera cuatro etapas de filtración y una etapa de remoción de condensados (ver Figura 12). Es pertinente indicar que el filtro de bronce sinterizado (22 μm) y la canastilla de condensación que se aprecian en la Figura 12 se encuentran dentro de un recipiente adiabático (aislado térmicamente) que contiene agua en equilibrio junto con tres elementos de congelación (gel encapsulado). El agua en equilibrio con las capsulas de gel congeladas facilita y promueve la condensación del agua diluida en el efluente preservando la integridad del cuerpo de sensores de infrarrojo del analizador de gases.

El agua que condensa en este dispositivo es removida desde la purga inferior de la canastilla de condensación al final del ensayo. Las capsulas de gel congeladas se reemplazan por nuevas luego de cada experimento. A diferencia de la canastilla de condensación, los elementos filtrantes (incluyendo el filtro coalescente) que se muestran en la Figura 12 tienen el objetivo de remover material particulado previniendo averías en el cuerpo de sensores del analizador de gas. Todos los elementos filtrantes son reemplazados por elementos filtrantes nuevos antes de cada experimento. Las conexiones entre las etapas de acondicionamiento del gas (filtros y condensador) y el analizador utilizan mangueras de hule de alta temperatura. Cabe indicar que luego de cada experimento se ejecuta un

mantenimiento escrupuloso de toda la línea de transporte de gases que incluye, el reemplazo de elementos filtrantes y la limpieza con aire comprimido de todas las cañerías, acoples y ductos. La Figura 13 agrupa un conjunto de fotografías que dan cuenta de la infraestructura experimental itinerante desarrollada por el equipo consultor y que se instaló en las organizaciones seleccionadas para el muestreo respectivo.



Figura 13. Infraestructura experimental itinerante desarrollada por el equipo científico de BDA para el estudio del proceso de combustión de biocombustibles sólidos derivados de agro residuos en quemadores de lecho fijo con propagación de llama horizontal (LFH) y lecho fijo con propagación de llama vertical (LFV). Se muestra las líneas de acondicionamiento y muestreo de gases y temperaturas. Arriba: instalación de la infraestructura en el centro de acopio de la organización APROCCE. Abajo: instalación de la infraestructura en el centro de acopio de la organización APROCEL.

Tal como muestra la Figura 12, la infraestructura experimental cuenta con un set de cuatro termocuplas ubicadas en puntos estratégicos del sistema de combustión. Estas termocuplas tienen el objetivo de monitorear el comportamiento del quemador y los niveles de temperatura alcanzados en cada punto. El tipo de termocuplas utilizado tienen un rango de medición entre 0 y 1000 °C y son del tipo “K”, especiales para mediciones en atmósferas oxidantes. Para la adquisición de datos de temperatura (ver Figura 12) se utilizó un *datalogger* de cuatro canales del modelo Logger 88598 (4ch K SD). El *datalogger* registra la temperatura en cada punto de medición en intervalos de quince segundos. La Tabla 6 muestra en detalle la ubicación de las cuatro termocuplas utilizadas en este estudio.

Tabla 6.- Nomenclatura y ubicación de las termocuplas instaladas para el estudio del proceso de combustión de pellets de cascarilla de café en quemadores de lecho fijo con propagación de llama horizontal (LFH) y lecho fijo con propagación de llama vertical (LFV).

Termocupla	Ubicación
T1	Temperatura en la cámara de combustión (nivel quemador)
T2	Temperatura en la cámara de combustión (nivel <i>freeboard</i>)
T3	Temperatura del gas efluente
T4	Temperatura del aire que ingresa al secador

Cabe destacar que las termocuplas T1 y T2 se ubicaron dentro de la cámara de combustión. Para este efecto el equipo consultor diseñó y construyó un mecanismo de anclaje con aislamiento térmico de alta temperatura. De este modo las termocuplas se ubicaron directamente en la zona de combustión tal como muestra la Figura 14. Este mecanismo de anclaje se instaló en la compuerta lateral de inspección del intercambiador de calor. El anclaje y aseguramiento del mecanismo se ejecutó con soldadura MIG/MAG que fue posteriormente retirada luego de cada experimento dejando el intercambiador en las mismas condiciones en que se encontraba a la llegada del equipo de ingeniería e investigación. Por otro lado, se practicaron orificios con taladro y broca sobre el ducto de descarga del efluente para permitir la instalación de las termocuplas T3 y T4. Para todos estos efectos el equipo consultor trasladó su propio equipo de perforación y soldadura junto con las herramientas y todo el equipo de protección personal apropiado. La Figura 14 muestra el mecanismo de protección y anclaje utilizado para la ubicación de las termocuplas T1 y T2. Además, se muestra una fotografía del mecanismo instalado dentro del intercambiador de calor.



Figura 14. Mecanismo de protección y anclaje utilizado para la ubicación de las termocuplas T1 y T2 desarrollado por el equipo consultor para el estudio del proceso de combustión de pellets de cascarilla de café en quemadores de lecho fijo con propagación de llama horizontal (LFH) y lecho fijo con propagación de llama vertical (LFV). Se muestra sellante con cinta de aluminio de alta temperatura y aislante térmico (lana de roca) utilizado para preservar los cables de conexión entre la termocupla y el *datalogger* de temperaturas.

Una vez alcanzada la condición de estado estacionario y con el sistema de generación de energía térmica suministrando aire a temperatura constante hacia el secador, se realiza un muestreo de gases de 4 horas por cada tipo de biocombustible. Con esta base, la eficiencia de combustión se calculó por medio de la siguiente expresión:

$$Eff = \frac{CO_2 \%vol}{CO_2 \%vol + CO \%vol} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

8.2. Análisis fisicoquímico en laboratorio de los biocombustibles utilizados

El equipo científico de BDA ha dispuesto de un presupuesto propio para determinar con normas internacionales la composición física y química de los biocombustibles utilizados en los proyectos implementados. La Tabla 7 presenta los resultados del análisis proximal y elemental practicado a muestras de cascarilla de café recogida en las instalaciones del centro de acopio de la organización APROCEL en la provincia de Sucumbíos y de la cáscara de palma y fibra de mesocarpio recogidas en una extractora de aceite local. Las muestras utilizadas en los análisis fisicoquímicos de laboratorio se recogieron siguiendo los procedimientos establecidos en la norma UNE-CEN/TS 14778-1:EX, reconocida como apropiada para la recolección de muestras representativas in situ. Consecuentemente, el contenido de Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno y Azufre se determinó en laboratorio siguiendo la norma BS EN 15104:2011. Complementariamente, la humedad, la ceniza, la materia volátil y el poder calorífico se determinaron de acuerdo con los procedimientos de laboratorio BS EN 14774-3:2009, BS EN 14775:2009, BS EN 15148:2009 y ASTM D 1989-96, respectivamente. De forma referencial y con motivos de análisis, la Tabla 7 incluye la composición fisicoquímica típica de un pellet normalizado para uso como biocombustible sólido en la Unión Europea [16].

Tabla 7. Composición fisicoquímica (proximal y elemental) de una muestra de cascarilla de café tomada en el centro de acopio de la organización APROCEL y de cuesco de palma y fibra de mesocarpio de una extractora de la localidad. Como referencia se adjunta la composición fisicoquímica típica de un pellet para uso como combustible sólido en la Unión Europea [16].

	Cascarilla de café	Cuesco de palma	Fibra de mesocarpio	Pellet UE
Análisis Proximal (%wt_{bh})				
Humedad	9.4	12.8	37.2	4.6
Materia Volátil	67.6	73.1		70
Ceniza	7.1	2.4	13.4	0.3
Carbono Fijo ^a	15.9	11.7		25.1
Análisis Elemental (%wt_{bs})				
C	41.8	47.8	47.2	47.5
H	10.7	6.0	6.0	6.2
N	1.9	0.6	1.4	0.09
S	b	b	0.3	b
O ^a	38	43.1	36.7	45.9
Ceniza	7.6	2.5	8.4	0.32
Poder calorífico inferior - PCI (MJ/kg_{bs})	17.8	17.7	18.3	18

^aValor Calculado por diferencia

^b Valor se encuentra por debajo de límite de detección del equipo de medición (100 ppm)

La Tabla 7 muestra que el PCI de los biocombustibles utilizados están dentro de las magnitudes del PCI de un pellet ratificado como apropiado para su uso como combustible sólido en la Unión Europea (18 MJ/kg). No obstante, es importante notar que la cascarilla de café y la fibra de mesocarpio tienen un contenido de ceniza 26 veces mayor que un pellet normalizado para uso como biocombustible sólido. Así mismo, se puede notar que la cáscara de palma africana tiene un contenido de ceniza 7 veces mayor que un pellet normalizado para uso como biocombustible

sólido (ver Tabla 7). Cabe destacar que en la literatura científica un elevado contenido de cenizas está vinculado con potenciales y frecuentes problemas operativos en los dispositivos de combustión como quemadores y calderos. Se conoce que la acumulación de ceniza provoca inestabilidades en el frente de llama. Así mismo, se está al corriente de que la ceniza -principalmente aquella de bajo punto de fusión- da lugar a la formación de fundiciones y escorias que se adhieren al lecho de combustión degradándolo progresivamente.

Es francamente sobresaliente el que la start-up ecuatoriana BDA haya conseguido desarrollar una tecnología y un quemador capaz de operar con la elevadísima concentración de cenizas que presentan biocombustibles como cascarilla de café, la fibra de mesocarpio o la cáscara de palma africana. Es esta precisamente una de las características que le otorgan extraordinario valor al desarrollo tecnológico al cual este informe nos convoca. Por otro lado, se debe notar que el contenido de nitrógeno de los biocombustibles que se utilizan en las organizaciones es entre 6 y 21 veces mayor que aquel observado en un pellet para uso como combustible sólido en la Unión Europea. Durante el proceso de combustión, la conjugación de elevadas concentraciones de nitrógeno en el biocombustible sólido junto con elevadas temperaturas en la cámara de combustión ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) podrían dar origen a la formación de compuestos nitrogenados en el efluente gaseoso que libera el quemador, a saber, NO_x . Es pertinente alertar que los compuestos nitrogenados del tipo NO_x emitidos en cantidades relevantes y a escala global contribuirían con la formación de ozono en las capas bajas de la atmósfera, lo que da lugar a la formación de nieblas fotoquímicas (smog). Se debe considerar también que los NO_x están categorizados como gases con potencial de efecto invernadero que además tienden a reaccionar con otros compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera causando lluvias ácidas. Por lo tanto, el apropiado control de las condiciones operacionales del proceso de combustión y apropiado ajuste de la estequiometría del quemador es clave para evitar la formación de NO_x , tareas que con destreza ha sabido gestionar e implementar el equipo científico y de ingeniería de la start-up BDA. La Figura 15 muestra un detalle fotográfico de los tipos de biocombustibles utilizados y testeados en los sistemas de secado auspiciados por CEFA en las organizaciones de agricultores del norte de la Amazonía y Manabí.



Figura 8. De izquierda a derecha. Arriba i) pellets de cascarilla y ii) cáscara de palma africana. Abajo: iii) cascarilla de café (4:1 %vol) y iv) pellets de fibra de mesocarpio.

Es importante destacar que el equipo científico y de ingeniería de BDA ha desarrollado y documentado de forma individual toda la técnica y maquinaria necesaria para la producción de estos biocombustibles pelletizados derivados de agro residuos. Estos detalles se encuentran apropiadamente descritos y documentados en informes técnicos que actualmente se encuentran bajo custodia de CEFA. A breves rasgos, se confirma la factibilidad de triturar la cascarilla de café y la fibra de mesocarpio en un molino de martillos (220v y 5HP) equipado con una malla de salida (criba) con orificios de 2mm. Posteriormente, se reporta que ambos agro residuos triturados se peletizan/granulan con éxito utilizando una peletizadora de rodillos Anyang Gemco Energy Machinery Co (15 HP – 220V trifásica, 300 MPa). El proceso de peletización/granulación encontró su mejor eficiencia cuando la humedad de la materia prima utilizada en la peletizadora está entre 20 al 25 % p/p y cuando la temperatura en la matriz de peletización está entre 50 a 70 °C. Bajo estas condiciones la capacidad de producción de pellets de cascarilla de café efectiva fue de 109.4 kg/h. Cabe indicar que el equipo científico y de ingeniería de BDA advierte que es necesario ajustar el diseño del molino y la potencia del motor eléctrico que lo acciona para que la capacidad de trituración esté acorde a la demanda de materia prima de la peletizadora, es decir 109.4 kg/h. Con estas consideraciones, el equipo científico y de ingeniería de BDA plantea un diagrama de flujo preliminar como guía para el montaje de una línea piloto de peletización de agro residuos en las asociaciones de agricultores apoyadas por CEFA.

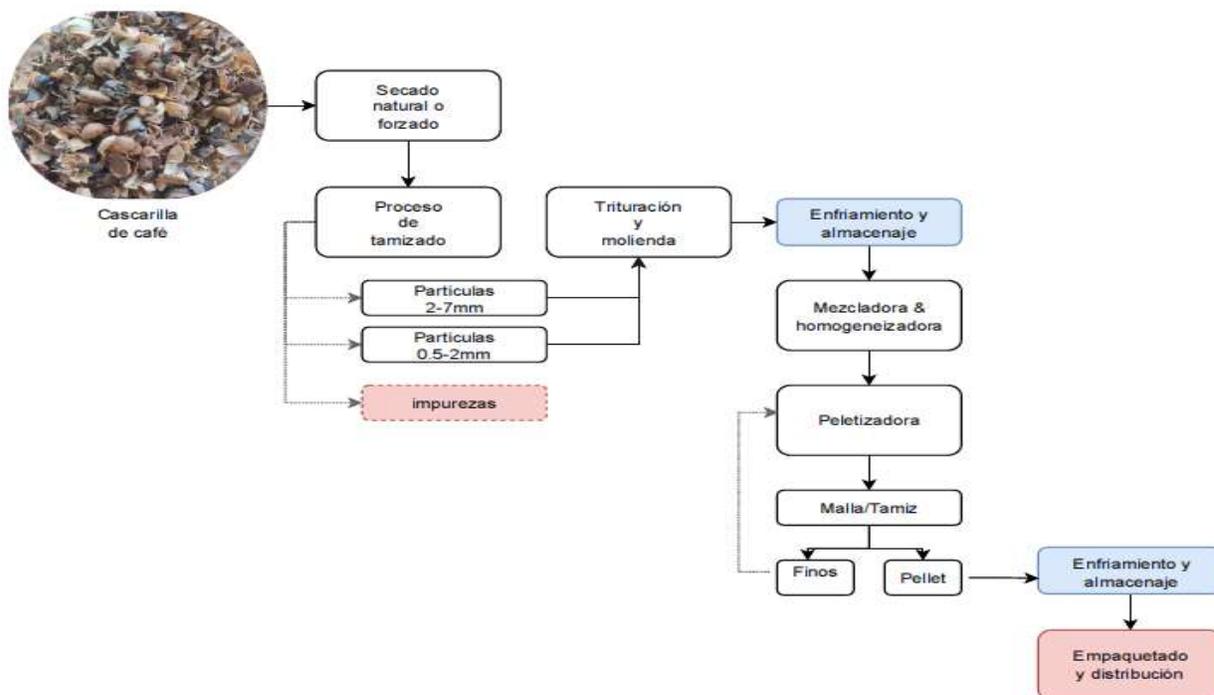


Figura 9. Diagrama de flujo preliminar de un proceso de peletización de agro residuos (cascarilla de café, fibra de mesocarpio). Capacidad de producción de pellets: 110 kg/h.

9. Eficiencia de la tecnología implementada

9.1. Combustión de agro residuos en las organizaciones favorecidas

Los resultados de la investigación en campo confirman que la tecnología de combustión con mayor eficiencia y menor impacto en las emisiones corresponde al reactor de lecho fijo y propagación de llama horizontal cuando utiliza cuesco de palma africana como biocombustible. Este tipo de reactor se encuentra instalado en las organizaciones KALLARI, APROCCE, PRIMAVERA y ASOMACHE (ver Sección 6.1). Según la normativa europea la concentración de CO máxima en sistemas de combustión de naturaleza industrial que utilizan biocombustibles sólidos es de 500 mg/Nm³. En la Tabla 8 se observa que tanto el uso de cuesco de palma como de los pellets de fibra de mesocarpio en un reactor de lecho fijo y propagación de llama horizontal cumple con la normativa de ecodiseño y emisiones europea EU 2015/1188-89 L193/76-100 en relación con la concentración de CO (monóxido de carbono) en el efluente gaseoso. Los valores de CO (concentración en mg/Nm³) observados cuando se utilizan cuesco de palma y pellets de fibra de mesocarpio como biocombustibles se encuentran significativamente debajo del límite máximo permitido en la referida norma, 365 y 256 mg/Nm³ respectivamente. Así mismo, se ha podido verificar que la concentración de monóxido de carbono en el efluente cuando se utiliza una mezcla de 4:1 %vol de cuesco de palma africana y pellets de cascarilla de café (CO 431 mg/Nm³) estaría por debajo del límite de 500 mg/Nm³ especificado por la normativa europea (EU 2015/1188-89 L193/76-100). En otras palabras, es posible aproximar que una relación de mezcla a partir de 4:1 %vol entre un combustible de apropiadas condiciones y cascarilla de café, permitiría consolidar un pellet cuyo desempeño en un quemador de lecho fijo y propagación de llama horizontal estaría acorde con la normativa europea. El equipo científico de BDA ha observado que a medida que se incrementa la proporción de pellets de cascarilla de café en la mezcla de combustible con cuesco de palma (por ejemplo 2:1, 1:1 y 1) la concentración de CO en el efluente aumenta por encima del límite de 500 mg/Nm³ establecido por la normativa que guía los análisis experimentales, EU 2015/1188-89 L193/76-100. Esta diferencia

en la concentración de CO en el efluente gaseoso que emana el quemador cuando se utiliza exclusivamente cuesco de palma africana y cuando se lo utiliza en mezcla con pellets de cascarilla de café confirma el efecto perjudicial de estos últimos sobre el proceso de combustión.

Para el caso del cuesco de palma y de los pellets de fibra de mesocarpio, además de la baja concentración de CO en el efluente, la apropiada conversión térmica de estos biocombustibles se puede corroborar con el valor de eficiencia alcanzado cuyo valor se acerca al 99 % (Tabla 8). Si bien es cierto que la eficiencia y la concentración de CO en el efluente gaseoso se encuentran en valores idóneos, es importante notar que el uso de pellets de fibra de mesocarpio produjo una reducción de la temperatura del aire de secado de aproximadamente 10 °C. Esta disminución en la temperatura de secado (la temperatura del aire que se suministra al secador) se puede atribuir a las condiciones estequiométricas del proceso de combustión. Se debe notar además que la utilización de pellets de fibra de mesocarpio da como resultado un ligero incremento en la concentración de compuestos nitrogenados en el efluente gaseoso como monóxido de nitrógeno NO (ver Tabla 8). Este incremento en la concentración de NO en el efluente gaseoso estaría asociado a la mayor concentración de nitrógeno en la composición fisicoquímica de la fibra de mesocarpio (ver Tabla 7) y al coeficiente lambda utilizado durante el proceso de combustión.

Tabla 8.- Composición del gas efluente y eficiencia de combustión observada en los ensayos experimentales ejecutados por el equipo científico y de ingeniería de la empresa BDA durante la combustión de diversos tipos de biocombustibles sólidos derivados de agro residuos.

Biocombustible	Tipo de quemador	Composición del efluente gaseoso (u)	Eficiencia de combustión (%)
Cuesco de palma africana	Lecho fijo, propagación de llama horizontal	*CO: 365 mg/Nm ³ CO ₂ : 15 % vol HC: 1.6 ppm O ₂ : 5.5 % vol NO: 232.6 ppm	99.8
Pellet de fibra de mesocarpio	Lecho fijo, propagación de llama horizontal	*CO: 256 mg/Nm ³ CO ₂ : 16 % vol HC: 0.02 ppm O ₂ : 3.7 % vol NO: 283 ppm	99.7
Pellet de cascarilla de café	Lecho fijo, propagación de llama vertical	*CO: 91412.5 mg/Nm ³ CO ₂ : 3.8 %vol HC: 304.3 ppm O ₂ : 16.2 % NO: 40.5 ppm	61
REGIMEN DE CO-COMBUSTIÓN			
Mezcla de 4:1 %vol entre cascarilla de café y cuesco de palma africana	Lecho fijo, propagación de llama vertical	*CO: 11276.6 mg/Nm ³ CO ₂ : 12.3 %vol HC: 18.3 ppm O ₂ : 8.6 % vol NO: 90.3 ppm	94.1
Mezcla de 4:1 %vol cuesco de palma y pellet de cascarilla de café	Lecho fijo, propagación de llama horizontal	CO: 431.5 mg/Nm ³ CO ₂ : 9.7 %vol HC: 4.8 ppm O ₂ : 11.5 % vol NO: 117.8 ppm	99.8

*Los valores de CO se han expresado en mg/Nm³ y han sido corregidos al 11% de Oxígeno en el efluente conforme la normativa EU 2015/1188-89 L193/76-100. En estas condiciones, la normativa europea establece un límite máximo para la concentración de CO de 500 mg/Nm³.

Por otro lado, la Tabla 8 muestra la concentración promedio de CO, CO₂, HC, O₂ y NO_x correspondiente a los experimentos realizados en la organización APROCEL en el reactor de lecho fijo y propagación de llama vertical (ver Sección 6.2). Se observa que la mezcla de agro residuos que ha utilizado este quemador desde el momento de su arranque en 2018 (4:1 %vol de cascarilla de café sin tratamientos y cuesco de palma africana) da como resultado una concentración de monóxido de carbono (CO) que supera en 22.5 veces el nivel de emisiones de CO estipulado por la normativa EU 2015/1188-89 L193/76-100 que es de 500 mg/Nm³. Esta condición se hace evidente por las emisiones que se observan en la chimenea del intercambiador de calor. Sin embargo, es importante indicar que esta concentración de CO es ocho veces más baja que la observada durante la combustión de pellets de cascarilla de café. Como muestra de ello, el porcentaje de hidrocarburos no combustionados (HC) disminuye de 304.3 ppm a 18.3 ppm. Esta mejoría se debe a la presencia de cuesco de palma en la formulación del biocombustible, cuyas propiedades mejoran el rendimiento y desarrollo del proceso de combustión. No obstante, en todos los casos evaluados se supera el límite de emisiones de 500 mg/Nm³ estipulado por la normativa EU 2015/1188-89 L193/76-100.

Con base en estas observaciones y cuantificaciones realizadas durante las componentes experimentales se ha podido confirmar que la combustión de cascarilla de café, en cualquiera de sus modalidades -pelletizada o en régimen de co-combustión- está asociada a emisiones significativas como efluente. A este respecto, se puede afirmar que -en términos técnicos- la ruta de conversión termoquímica que considera procesos de combustión no sería la más conveniente para valorizar apropiadamente la cascarilla de café. Por lo tanto, el equipo científico de BDA hace disponibles los datos de sus investigaciones propias que sustentan que la ruta de conversión termoquímica más apropiada para la cascarilla de café tendría que ver con procesos de pirólisis en los que -mediante la tecnología apropiada- se produzca de manera combinada energía térmica para los procesos de secado y biochar.

9.2 Pirólisis: estudios complementarios del equipo científico de la start-up BDA

Como parte de la ruta de valorización termoquímica, los procesos de pirólisis ofrecerían alternativas para proporcionarle valor agregado a la cascarilla de café en un espectro que supera la mera producción de energía térmica (calor para el secador). En un proceso de pirólisis moderno la cascarilla de café podría convertirse de forma simultánea en energía térmica (para el secador) y en biocarbón o biochar. El biochar es un material carbonáceo emergente con aplicaciones en agricultura orgánica (enmienda de suelos), filtración de aguas, procesos de remediación ambiental, suplemento en alimentación animal, control de sequías, como aditivo en la formulación de concretos (infraestructuras grises) y asfaltos (carreteras) y por ende aplicaciones para secuestro de carbono. En este sentido el equipo científico de BDA en co- autoría con científicos portugueses y alemanes y junto con el director de CEFA han elaborado un artículo científico en el que se describe la factibilidad de implementación de esta tecnología en centros de acopio de organizaciones de agricultores [17]. Cabe indicar que el equipo científico de la start-up BDA cuenta con información experimental de respaldo para sostener esta afirmación. En un estudio ejecutado en 2020 -aun no publicado- el equipo científico y de ingeniería de BDA determinó que la concentración de CO (458.3 mg/Nm³) observada durante la combustión del gas sintético generado durante el pirólisis de la cascarilla de café estaría por debajo del límite de 500 mg/Nm³ establecido por la normativa europea EU 2015/1188-89 L193/76-100. Así mismo, el equipo consultor determinó que las propiedades del biochar producido a partir de la cascarilla de café cumpliría con los estándares internacionales para su aplicación en suelos emitidas por la "European Guidelines for the sustainable production of biochar" [18]. Usando esta normativa como referencia se puede afirmar que el biochar producido a partir de cascarilla de café tiene un contenido de carbono > 50 % P/P, su relación O/C_{org} es < 0.4 (adecuada estabilidad en suelos) y su relación O/C_{org} es < 0.7 (apropiado grado de

carbonización y baja aromaticidad). La Tabla 9 muestra la composición físicoquímica del biochar producido por el equipo científico de BDA en su propia planta piloto de carbonización a partir de cascarilla de café en 2020. Mayores detalles sobre estos resultados experimentales se pueden consultar en el trabajo de tesis del Dr Mario A. Heredia S [19]. Es importante indicar que la tecnología de carbonización a la que corresponden estos resultados experimentales incluye un reactor de pirólisis del tipo tornillo con recuperación de energía térmica del tipo P-SMART concebido, diseñado y construido en su totalidad en Ecuador. Mayores detalles sobre la tecnología de carbonización utilizada por BDA para convertir la cascarilla de café en biocarbón/biochar se pueden consultar en la publicación científica del equipo de investigación de BDA [20].

Tabla 9. Composición físicoquímica (proximal y elemental) de biochar producido a partir de cascarilla de café generada en el centro de acopio de la organización APROCEL. Tecnología de carbonización: reactor de pirólisis del tipo tornillo con recuperación de energía térmica P-SMART [20].

Biochar de cascarilla de café	
Análisis Proximal (%wt_{bh})	
Humedad	9.8
Materia Volátil	13
Ceniza	15
Carbono Fijo ^a	62.2
Análisis Elemental (%wt_{bs})	
C	67.4
H	3.3
N	2.4
S	^b
O ^a	9.3
Ceniza	17.6
Poder calorífico inferior - PCI (MJ/kg_{bs})	27.8
H/C_{org}	0.6
H/C_{org}	0.1

^aValor Calculado por diferencia

^b Valor se encuentra por debajo de límite de detección del equipo de medición (100 ppm)

9.3 Cenizas generadas por la tecnología implementada: propiedades y aplicaciones

Cabe indicar que el quemador de lecho fijo y propagación de llama horizontal dispone de un sistema automático de remoción de cenizas cuya activación está automatizada en periodos de 25 minutos. La investigación experimental en campo ha permitido confirmar que la activación de este mecanismo no provoca perturbaciones significativas en el perfil de temperaturas del secador y que esta remoción continua de las cenizas permite el adecuado funcionamiento y rendimiento del quemador a pesar de la elevada concentración de minerales en los biocombustibles utilizados (ver Tabla 7). No obstante, en la inspección realizada a los sistemas de combustión luego de las campañas experimentales, se pudo verificar la presencia de cuerpos de ceniza sinterizados en el recolector inferior del intercambiador de calor (ver Figura 10). Estos cuerpos de ceniza sinterizados se forman debido a las

elevadas temperaturas alcanzadas durante el proceso de combustión. Los elementos de bajo punto de fusión que forman parte del contenido mineral en el biocombustible interactúan para formar mezclas eutécticas que se aglomeran formando piezas largas de ceniza sinterizada. Es conocido que los fenómenos de fusión de cenizas representan una desventaja en cuanto la valorización energética por procesos de combustión de biomasa residuales agrícolas. Afortunadamente, el sistema de combustión implementado bajo el auspicio de CEFA cuenta con un sistema de desalojo automático y permanente de cenizas desde la cámara de combustión. Este sistema de desalojo pulsante de cenizas permite mantener el proceso de combustión bajo condiciones estables. De cualquier modo, se sugiere estudiar apropiadamente los fenómenos corrosivos que podrían derivarse de la presencia de elementos alcalinos en la ceniza como potasio, calcio y/o cloro.



Figura 10. Piezas de ceniza sinterizada identificadas en la zona baja del intercambiador de calor luego de la campaña experimental en el quemador de lecho fijo y propagación de llama horizontal en APROCCE utilizando pellets de fibra de mesocarpio como biocombustible.

Como referencia y aporte excepcional, BDA ha determinado en laboratorio la composición aproximada de las cenizas que se generan como resultado del uso de cuesco de palma africana como biocombustible en los quemadores implementados. Es conocido, que esta ceniza contiene elementos inorgánicos que provienen del suelo, y que, por lo tanto, tendrían un interés potencial para la formulación de abonos y enmiendas de suelo. El uso de las cenizas generadas por el quemador representaría un beneficio adicional para las organizaciones que podrían disponer de este material como aditivo para los procesos de compostaje y elaboración de bioinsumos. Según el análisis de laboratorio practicado por BDA, la ceniza generada en el quemador de agro-residuos instalado por BDA tendría importantes concentraciones de Silicio (30% p/p), Potasio (8% p/p), Fósforo (3% p/p) y Calcio (1.3% p/p). La Figura 11 muestra el detalle de concentración de cenizas determinado por el equipo científico de BDA mediante la técnica de digestión acida y espectrometría de absorción atómica.

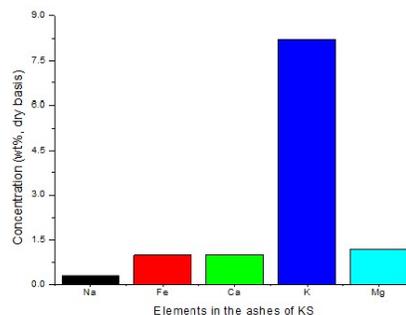


Figura 11. Composición de la ceniza producida en el quemador de lecho fijo y propagación de llama horizontal cuando se utiliza cuesco de palma africana como biocombustible.

10. Impactos económicos y ambientales vinculados con la tecnología implementada.

Para evaluar el impacto económico vinculado con la implementación de la tecnología de producción de energía térmica con uso de biocombustibles derivados de agro residuos se realiza un análisis individual caso a caso en las cinco organizaciones intervenidas. Las organizaciones intervenidas se pueden consultar en la Tabla 3. Esto por cuanto el sistema de generación de energía térmica instalado en cada organización tiene particularidades que influyen en el costo final de secado. Por ejemplo, APROCCE y PRIMAVERA requieren un sistema electrógeno a diésel que permite accionar las turbinas del secador y que se debe operar en paralelo con el proceso de secado. Por otro lado, KALLARI, APROCEL y ASOMACHE cuentan con sistemas de suministro eléctrico que les permiten accionar sus sistemas de secado directamente desde la red eléctrica sin necesidad de grupos electrógenos. La Tabla 10 muestra un detalle de los componentes y características de los sistemas de secado que existían en las organizaciones beneficiadas antes de la intervención tecnológica auspiciada por CEFA. Así mismo, en el caso de APROCEL, una parte del biocombustible utilizado (cascarilla de café 50 % p/p) no tiene asociado un costo por material ni de transporte una vez que se encuentra disponible en el centro de acopio.

Tabla 10.- Componentes y características de los sistemas de secado considerada para el cálculo del impacto económico que resulta de la intervención tecnológica ejecutada en los sistemas de secado de las organizaciones beneficiadas.

	APROCEL 1 (LFV)	APROCEL 2 (LMH)	APROCCE	KALLARI	PRIMAVERA	ASOMACHE
TURBINA 10 HP	X	X				
TURBINA 5 HP			X	X	X	
GENERADOR BAIFA C40-60			X		x	
QUEMADOR DIESEL	X	X	X	X	X	
QUEMADOR A GAS						X

Para estimar el costo por cada hora de operación del secador es necesario definir el costo de operación de cada uno de los dispositivos del sistema de secado (Tabla 10). Recurriendo a las placas de identificación de cada dispositivo y a los datos disponibles se presentan a continuación en la Tabla 11 los valores considerados para el cálculo de impactos económicos.

Tabla 11.- Detalle de costos de operación de cada dispositivo del sistema de secado en las cinco organizaciones beneficiadas. Datos recolectados con técnicas de investigación participativa y observaciones en campo.

	COSTO DE OPERACIÓN (USD/h)	CONSIDERACIONES
TURBINA 10 HP	0.57	Costo de electricidad considerado 0.09 USD/kWh. Potencia resultante turbina 6.30 kW (datos de placa del motor V:220 A:25.8 / Eff 89% IE3)
TURBINA 5 HP	0.19	Costo de electricidad considerado 0.09 USD/kWh. Potencia resultante turbina 2.18 kW (datos de placa del motor V:220 A:9.1 / Eff 91% IE2)
GENERADOR BAIFA C40-60	4.38	Consumo grupo electrógeno según catálogo: 2.31 gal/h. Costo diésel: 1.9 USD/gal.
QUEMADOR BIOMASA	1.08	Costo de cuesco de palma puesto en la organización 0.04 USD/kg (costo real confirmado incluyendo costo de transporte). Consumo quemador: 27 kg/h
QUEMADOR DIESEL	5.7	Costo diésel: 1.9 USD/gal. Consumo de quemador de diésel según placa 3 gal/h.
QUEMADOR GLP	8.5	Costo GLP industrial: 0.79 USD/kg. Consumo equivalente quemador de GLP 10.65 kg/h, es decir aproximadamente un tanque (15 gal) por hora.

La Tabla 12 muestra el costo de las operaciones de secado calculado en cada organización en cuanto se refiere a maquinaria, es decir, se ha excluido de esta estimativa el valor de mano de obra del operador del secador. Vale la pena aclarar que el costo de operación que se indica en la Tabla 12 corresponde a la condición inicial de las organizaciones, es decir, antes de que CEFA intervenga con nueva tecnología a los secadores. De manera comparativa, se incluyen los costos actuales de secado en cada una de las organizaciones intervenidas con la nueva tecnología que permite utilizar biocombustibles sólidos derivados de agro residuos para generar la energía consumida por el secador. Para este cálculo se ha considerado que ASOMACHE, PRIMAVERA, KALLARI y APROCCE utilizan cuesco de palma africana como biocombustible. En el caso de APROCEL ambos quemadores utilizan una mezcla de 4:1 en volumen de tamo de café y cuesco de palma africana (ver Tabla 3). Considerando la densidad volumétrica de cada biocombustible, esta relación entre cuesco y cascarilla de café equivale a una relación de 1:1 en peso. Igualmente, el cálculo presentado en la Tabla 12 considera los costos de operación de la turbina y el grupo electrógeno para los casos de Primavera y APROCCE. Actualmente, en estas dos organizaciones ya no es necesario accionar el generador de electricidad pues ya cuentan con un suministro apropiado desde la red.

Tabla 12.- Costos de operación del sistema de secado en las cinco organizaciones beneficiadas antes y después de la intervención tecnológica. Valores presentados en dólares americanos por cada hora de operación.

COSTO OPERACIÓN SECADO POR TIPO DE COMBUSTIBLE*	APROCEL 1 USD/H	APROCEL 2 USD/H	APROCCE USD/H	KALLARI USD/H	PRIMAVERA USD/H	ASOMACHE USD/H
GLP	--	--	--	--	--	8.05
DIESEL	6.63	--	11.01	--	11.01	--
BIOCOMBUSTIBLE	1.17	1.17	1.4	1.4	1.4	1.4

*Cálculo incluye el costo de operación de la turbina de aire y el grupo electrógeno en los casos respectivos.

En general, la Tabla 12 muestra que la tecnología implementada ha permitido reducir entre 5 a 8 veces los costos de secado en las organizaciones intervenidas. Sobre esta base de cálculo la Tabla 13, muestra un resumen del impacto general en términos económicos para cada organización intervenida desde la fecha de implementación de la tecnología. La fecha de implementación en cada organización se puede consultar en la Tabla 3.

Tabla 13.- Beneficio global recibido por las asociaciones desde la fecha de implementación de la tecnología. Elaborado a la fecha de elaboración del informe.

		APROCEL 1	APROCEL 2	APROCCE	PRIMAVERA	KALLARI	ASOMACHE	TOTAL
HORAS DE OPERACIÓN*	(HRS)	1009.2	36	362.3	2229.4	109.1	306.3	4052.3
AHORROS EN COSTOS DE COMBUSTIBLE	(USD)	5502.6	197	2091.9	21591	529	2095.7	32007.2
EMISIONES CO₂ EVITADAS	(TON)	175.5	6.3	66.7	462.3	19	53.3	783.1
SUBSIDIOS AHORRADOS POR EL ESTADO	(USD)	9143.3	326.7	Secador: 3282.5	Secador: 20198 Generador: 16170	988.1	2155.5	52264.1
NUTRIENTES DE SUELO RECICLADOS (CENIZA)	(TON)	1.3	0.04	0.24	1.5	0.07	0.42	3.6
BARRILES DE PETROLEO DEJADOS EN TIERRA	(B _{eq})	67.6	2.4	24.3	264.5	7.3	20.5	386.6

*Horas de operación de cada sistema a la fecha de elaboración del informe de sistematización

Es importante notar que además de la reducción en los costos de los sistemas de secado, existen un conjunto de servicios ambientales vinculados al uso de biocombustibles sólidos derivados de agro residuos. La Tabla 13, resume los beneficios ambientales derivados de la valorización energética del cuesco de palma africana en las organizaciones intervenidas en términos de las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas, expresadas como toneladas de CO₂ equivalente. Para esta estimativa se ha considerado un factor de emisión de 3.2 kg de CO₂ por cada galón de diésel quemado [21]. Es pertinente esclarecer que el uso de biocombustibles -siendo ellos de origen renovable- evitan la emisión de CO₂. El cálculo de emisiones evitadas que se presenta en la Tabla 13 considera también un factor de emisión 4 kilogramos de CO₂ equivalente por cada kilogramo de agro residuo que se descompondría en caso de no ser valorizado energéticamente [22]. Es oportuno indicar que el uso de biocombustibles derivados de agro residuos (valorización energética) evita su descomposición en campo y por lo tanto la emisión de metano asociado (transformado como CO₂ equivalente). Tome en cuenta que el metano tiene un potencial de efecto invernadero 84-87 veces mayor que el CO₂ en un intervalo de 20 años y de 28-36 veces mayor que el CO₂ en un intervalo de tiempo de 100 años [23].

Un proyecto típico de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en Ecuador tiene un costo de inversión en infraestructura energética de alrededor de 3000 USD por tonelada de CO₂ reducida al año [24]. En el caso de los proyectos implementados en conjunto con CEFA para el uso de biocombustibles sólidos de origen renovable, la inversión en infraestructura energética tiene un promedio de 230 USD por tonelada de CO₂ reducida al año. Por lo tanto, la eficiencia de la inversión en actividades de mitigación de cambio climático ejecutada por CEFA y BDA es un referente de eficacia y eficiencia. También se debe destacar que las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas por las organizaciones beneficiadas con la tecnología además de ser significativa, podría tener repercusiones comerciales y de mercado. Por ejemplo, la potencial vinculación de estas contribuciones ambientales con los productos comercializados por las organizaciones intervenidas podría brindarles una posición privilegiada en el mercado frente a otros productos y competidores. La disminución de emisiones de CO₂ en los centros de acopio podrían alterar positivamente la percepción que los clientes tienen sobre la sostenibilidad y el compromiso ambiental de las organizaciones analizadas. Para ello, valdría la pena determinar cuántas toneladas de producto (café o cacao) se han comercializado y contrastarlas con el número de toneladas de CO₂ evitadas en un mismo periodo. Una relación de esta naturaleza nos permitiría sensibilizar a los actores en la cadena sobre el impacto ambiental positivo que generan actualmente las organizaciones intervenidas con la tecnología de biocombustibles.

Así mismo, es importante notar la contribución con la sostenibilidad financiera que brinda el uso de biocombustibles sólidos, que además de disminuir los costos operativos, permite que las organizaciones adquieran independencia de los subsidios estatales a los combustibles fósiles. Por lo tanto, se fortalece su modelo de gestión en términos ambientales, energéticos y sociales. Es por demás llamativo notar que en la Tabla 13 el principal beneficiado del reemplazo de combustibles fósiles es el propio estado ecuatoriano, pues el uso de biocombustibles sólidos derivados de agro residuos permite y facilita un retiro del subsidio programado, eficaz y con impactos positivos en el flujo de caja de las organizaciones. Los montos que el estado ahorra en subsidios son efectivamente considerables, inclusive vistos en la escala de estas cinco organizaciones intervenidas.

Respecto de los resultados expuestos en la Tabla 13 es importante considerar que son estimativas ejecutadas sobre la base de un costo de diésel de 1.90 USD/gal. No obstante, desde la implementación del primer prototipo en 2018 hasta la actualidad, el precio del diésel ha venido incrementándose. Por lo tanto, el cálculo del impacto económico en cada asociación en la realidad ha sido dinámico y se ido apreciando y mejorando conforme el precio del diésel ha ido aumentando. Ocurre lo mismo para el cálculo del subsidio que el estado deja de emitir una vez que una organización genera su energía térmica recurriendo a biocombustibles sólidos. Se debe notar que el valor

equivalente del subsidio toma como referencia el precio internacional del diésel, el mismo que varía y evoluciona en el tiempo conforme el precio internacional del petróleo. Por lo tanto, el cálculo del subsidio que el estado ahorra ha sido, al igual que el costo ahorrado por las organizaciones, variable a lo largo del tiempo. La Figura 12, presenta la evolución histórica de los impactos económicos en una base mensual del caso de implementación con el perfil de carga más representativo, que corresponde a la organización PRIMAVERA.

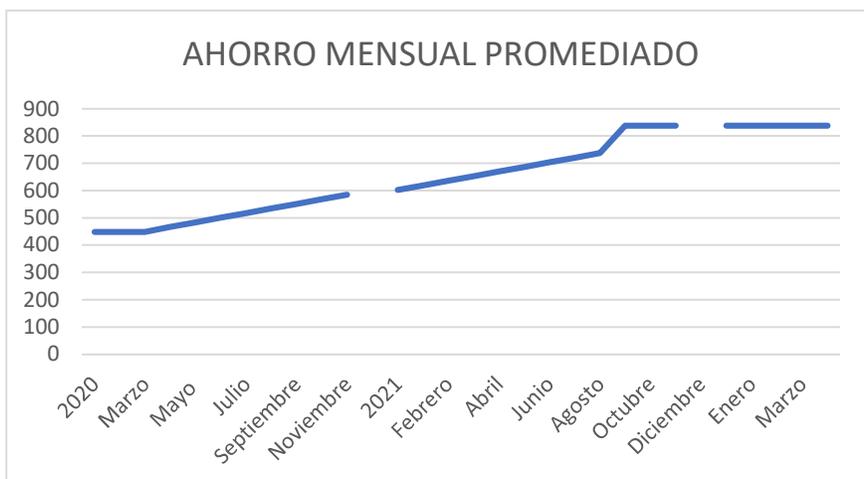


Figura 11. Ahorro mensual promediado en la organización Primavera Oriental a partir de la implementación del sistema de generación de energía térmica que utiliza biocombustibles sólidos. La curva de ahorros varía conforme la variación histórica de los precios del diésel en Ecuador.

La Figura 11 muestra la evolución de la inversión realizada en la organización Primavera misma que se ha ido apreciando desde la implementación de la tecnología para el uso de biocombustibles derivados de agro residuos. En el momento de instalación de este prototipo en la organización Primavera el costo del diésel era de 0.90 USD/gal. En promedio, los ahorros mensuales que se alcanzan en Primavera se han incrementado constantemente desde un valor de 450 USD/mes al momento de instalar la tecnología, hasta alcanzar un tope de cerca de 900 USD/mes con el precio del diésel congelado en 1.90 USD/gal. Siguiendo esta curva dinámica y considerando que la organización Primavera no ha erogado los importes correspondientes a la adquisición y traslado de cuesco de palma africana, mismos que han recaído sobre CEFA, se puede afirmar que el ahorro verificado más aproximado alcanzaría el monto de 20990.2 USD, valor en el orden del que se reporta en la Tabla 13.

Es también importante notar la cantidad de nutrientes del suelo reciclados en el sistema de generación de energía renovable implementado. Como resultado de la operación del quemador se generan cenizas que pueden ser aprovechadas en aplicaciones agrícolas (reincorporación al suelo). Como se expuso en la Sección 9.3 estas cenizas contienen minerales de importancia para la nutrición vegetal como Silicio (30% p/p), Potasio (8% p/p), Fósforo (3% p/p) y Calcio (1.3% p/p). La Tabla 13 muestra que en total se han podido recuperar 3.6 toneladas de ceniza que bien podría ser utilizada en los procesos de elaboración de bio insumos que están en marcha en las organizaciones. Finalmente, es importante indicar que, en lo global, se ha evitado el consumo de 17306 galones de diésel. Su equivalente en energía nos permite afirmar que desde la implementación de estos proyectos y hasta la fecha de elaboración de este informe se ha evitado la extracción de 386.6 barriles de petróleo.

10. Innovaciones en sistemas de secado: estudios complementarios

10.1. Sistemas de secado híbridos (solar – biocombustible)

Como se puede apreciar en la Tabla 13, el segundo sistema de generación de energía térmica instalado en APROCEL (Ver Sección 6.3) tiene un número de horas de operación inusualmente bajo (36 hrs) en comparación con el resto de los sistemas instalados. Esta condición obedece al hecho de que este tipo de quemador se ha integrado como parte de una plataforma experimental de secado en la organización APROCEL. Es decir, el uso de este quemador ha estado primordialmente destinado a actividades de I+D+i. A este respecto cabe aclarar que, en 2019, CEFA en conjunto con GIZ auspiciaron la implementación de una plataforma experimental para el secado de granos en la organización APROCEL que incluye tres marquesinas (M1, M2 y M3) del tipo túnel con características diferenciadas en las que se ha instalado una red de monitoreo de humedad relativa y temperatura. Este sistema además permite suministrar energía térmica -sobre la forma de aire caliente- hacia la marquesina M1. Esta energía se genera en el sistema de combustión que utiliza biocombustibles sólidos descrito en la Sección 6.3 y que se representa de forma esquemática en la Figura 12. Por lo tanto, se cuenta con un sistema de generación de energía renovable híbrido que combina dos fuentes de energía, a saber: solar y biocombustible sólido. Adicionalmente, las marquesinas M1 y M2 cuentan con sistemas de ventilación mecánica que tienen el objetivo de acondicionar la temperatura y humedad relativa del proceso de secado a los valores que permitan alcanzar una curva de deshidratación ideal. La Figura 12 muestra un esquema que describe la plataforma experimental para el secado de granos implementada en la organización APROCEL.

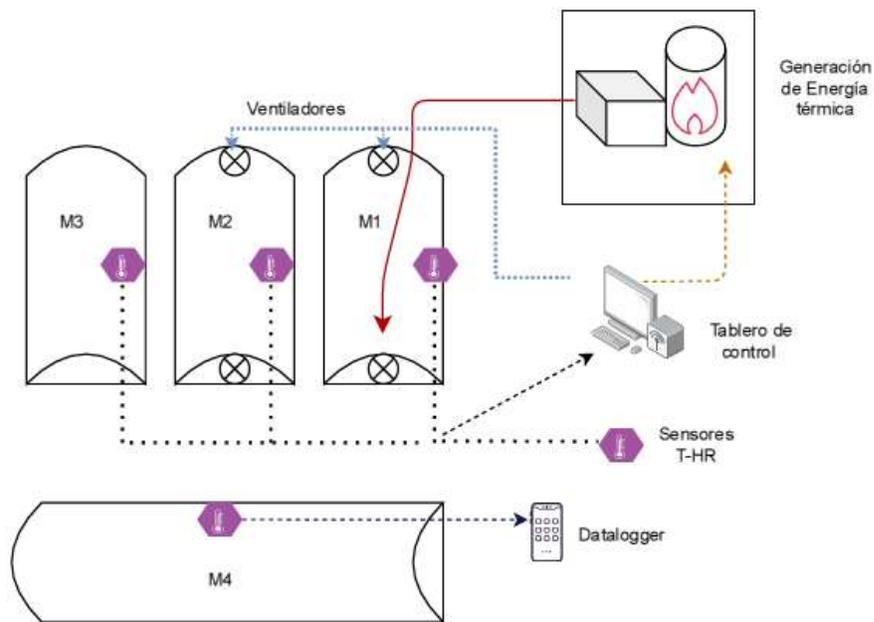


Figura 12. Esquema que muestra las marquesinas para secado solar de granos implementadas en APROCEL e identificadas como M1, M2, M3 y M4 (Tabla 1). El esquema muestra el sistema de control electrónico que enlaza las marquesinas M1, M2 y M3 mediante una red de monitoreo de sensores de humedad relativa y temperatura. La activación de los ventiladores montados en la M1 y M2 está comandada desde el tablero general según parámetros de temperatura o humedad relativa. Se muestra también el sistema de generación y distribución de energía térmica que es también comandado por el sistema de control electrónico. En el esquema, la marquesina M4 cuenta con un conjunto independiente de sensores de temperatura y humedad relativa cuyos registros se guardan en un datalogger electrónico independiente.

Es importante indicar que cada una de las marquesinas (M1, M2 y M3) tienen instalado en su interior un módulo electrónico desde el que se monitorea la temperatura y humedad relativa. Estos tres módulos electrónicos envían las señales adquiridas (T-HR) hacia un tablero general de control electrónico donde se organizan y almacenan. El sistema cuenta también con un cuarto módulo electrónico con sensores que monitorean las condiciones de temperatura y humedad relativa ambiental y la radiación solar incidente. Todas las señales electrónicas generadas por los sensores/módulos son enviadas al PLC del tablero general de control electrónico. Este tablero electrónico de control general cuenta con una interfaz gráfica de usuario monocromática (pantalla LCD). Todas las informaciones generadas por los sensores en la red de monitoreo se pueden ver en tiempo real en la interfaz de usuario y se graban automáticamente en una tarjeta SD acoplada al PLC principal del tablero general de control. La frecuencia de muestreo de las señales es de 5 minutos. Es importante indicar que el tablero general de control electrónico comanda también el arranque y operación del grupo de generación de energía térmica. Por lo tanto, es posible también parametrizar la cantidad de energía térmica que se suministra a la M1. El tablero general de control comanda también la activación de los ventiladores instalados en M1 y M2, conforme parámetros de temperatura y humedad relativa programables desde la interfaz de usuario.

Con el auspicio de CEFA, el equipo científico y de ingeniería de BDA desarrolló una metodología experimental que permite el análisis comparativo en campo de los tres tipos de marquesinas (M1, M2 y M3) que forman parte de la plataforma experimental de secado implementada en APROCEL. Cabe destacar que en el análisis se incluyó un tipo adicional de marquesina del tipo “chimenea” (M4) también disponible en APROCEL y cuya tipología se replica en varias organizaciones (Ver Tabla 1). La Figura 13 muestra el *set-up* experimental diseñado e implementado por BDA para el análisis comparativo de las marquesinas instaladas en APROCEL. El diseño experimental en campo consideró la fabricación e instalación de estanterías (tendales) con tres niveles en cada una de las marquesinas (M1-M4). Por lo tanto, se utilizó una tipología adicional de sensores -del tipo UT330-B- para el muestreo de temperaturas y humedades en las estanterías instaladas dentro de cada marquesina. La Figura 13 muestra el proceso de fabricación y ubicación de las estanterías en las marquesinas M1-4. En las marquesinas que disponen de la misma orientación (M1, M2 y M3) las estanterías se ubicaron exactamente en la misma posición, es decir a la altura del tercer pórtico y a 2 metros del módulo de sensado de temperatura y humedad relativa. De este modo, los sensores extra (del tipo UT330-B) se utilizaron para medir las diferencias de temperatura y humedad relativa entre la primera bandeja de la estantería (más cercana al piso) y la última bandeja. Finalmente, se utilizaron sensores del tipo IBS-TH1 para el monitoreo de las condiciones de temperatura y humedad relativa en la marquesina 4. Se ubicó un sensor dentro de la marquesina en una posición análoga a la observada en los módulos instalados en la M1, M2 y M3. Un sensor IBS-TH1 adicional se utilizó para medir las condiciones ambientales de humedad relativa y temperatura en las inmediaciones de la M4 y como medida comparativa al módulo de condiciones ambientales que está enlazado al sistema general de control electrónico (Figura 12).



Figura 13. Fabricación en campo de estanterías como parte del diseño experimental desarrollado e implementado por el equipo científico de BDA. Se instalaron estanterías de 3 niveles en cada marquesina (M1-M4). Para la marquesina 4, se utilizó la estructura disponible en el centro de acopio.

Es pertinente indicar que el nivel de complejidad de las operaciones de secado que pueden implementarse en la M1 en relación con el resto de las marquesinas (M2-M4) exige una observación pormenorizada del comportamiento de las curvas de humedad relativa y temperatura. En el siguiente enlace privado se puede acceder a un video descriptivo del sistema de secado del tipo híbrido solar-biomasa implementado en la M1: <https://youtu.be/48jpwFBL9p4>. Por lo tanto, para la M1, el equipo consultor definió un periodo de observación de 100 horas bajo diversas condiciones de carga y estrategias operativas. Posteriormente, el análisis comparativo de las marquesinas 1 a 4 recurrió a un macro lote homogéneo de cacao escurrido acopiado en APROCEL los dos días

previos al inicio del ensayo experimental. Los lotes de cacao que componen este macro lote tienen orígenes diversos y por tanto su humedad inicial podría diferir significativamente. Para distribuir lotes de producto con humedad homogénea entre cada una de las marquesinas, se juntaron todos los lotes de cacao escurrido disponibles en el centro de acopio y se mezclaron manualmente removiéndolos con una pala por un periodo de 15 minutos conformando de este modo un macro lote. La Figura 14 muestra el macro lote principal de cacao que se consolidó para la realización de una prueba de larga escala en la que se pueda comparar la curva de deshidratación en cada marquesina de forma simultánea, garantizando las mismas condiciones de radiación, temperatura ambiente y humedad relativa ambiente para cada marquesina además de una humedad de cacao homogénea. El macro lote principal de cacao consolidado y homogeneizado se fraccionó en cuatro lotes de volúmenes similares que posteriormente fueron repartidos en cada una de las cuatro marquesinas estudiadas. Se verificó que ingresaron cuatro carretillas de cacao escurrido en cada marquesina (ver Figura 14).



Figura 14. Macro lote de cacao utilizado como muestra para el análisis experimental del proceso de secado en las marquesinas 1-4. Proceso de homogeneización de los lotes con distintas procedencias y carga de carretillas para distribución entre las marquesinas 1-4.

Como se muestra en la Figura 13 el equipo científico de BDA fabricó 3 estanterías con tres niveles cada una. Estas estanterías se colocaron dentro de cada marquesina con el fin de evaluar un potencial aumento de la carga en las marquesinas 1 y 2 debido a las mayores temperaturas que en estas marquesinas se pueden alcanzar por ser del tipo túnel. En la bandeja correspondiente a cada nivel se colocaron muestras de cacao con 4500 g de peso cuya variación en masa se monitorea cada 12 horas. Es importante notar, que las bandejas que están ubicadas en los niveles N1 y N3 en cada estantería cuentan con sensores del tipo UT330-B, tal como se aprecia en la Figura 13. Además de las 12 bandejas de control se definió un área de control de 2 m² a ras de piso en cada marquesina. Las áreas de control definidas en las 4 marquesinas le permiten al equipo científico de BDA evaluar el proceso de secado siguiendo la operación típica del centro de acopio, es decir distribuyendo el cacao sobre el piso de la marquesina. Una captura de video que muestra toda la configuración experimental implementada para este ensayo de gran escala se puede consultar en el siguiente enlace: <https://youtu.be/6K-ORjb0wvk>.

Excluyendo los 18 kilogramos de cacao utilizados en las áreas de control de cada marquesina (área de control a ras de piso y bandejas), el restante del lote de cacao (el 95% en volumen aproximadamente) que se destinó para cada marquesina se distribuyó sobre el piso de estas, alrededor de las estanterías y de las áreas de control, tal como se

aprecia en la Figura 15. Este restante del lote de cacao de cada marquesina cumple la función de simulación de carga. De este modo, el equipo científico de BDA pretende evaluar el proceso de secado en condiciones que se asemejen a las condiciones reales de operación del centro de acopio. Tome en cuenta que, si bien realizar experimentos de secado utilizando únicamente micro lotes con 18 kg tendría validez procedimental, los resultados obtenidos difícilmente podrían extrapolarse a una operación habitual del centro de acopio. Ensayos con micro lotes de 18 kg tendrían validez exclusivamente teórica y de escasa utilidad para la asociación APROCEL o para extrapolar estos resultados a otras organizaciones. El diseño experimental propuesto por el equipo consultor en la presente sección (ver: <https://youtu.be/6K-ORjb0wvk>), aunque dispendioso en tiempo y recursos, ha permitido obtener resultados con validez teórico/práctica y además con utilidad y relevancia para la operación cotidiana del centro de acopio. La Figura 15 muestra las estanterías con bandejas a 3 niveles instaladas en una de las marquesinas estudiadas, el área de control delimitada a ras de piso, y las zonas de cacao distribuidas como simulación de carga. Vale la pena indicar que el proceso de agitación manual de las muestras de cacao se ejecutó de manera programada, en los mismos intervalos en que se registró la diferencia de peso en cada una de las áreas de control y las bandejas en tres niveles, es decir, cada 12 horas. El registro del peso en cada una de las áreas de control y las bandejas en tres niveles se ejecutó mediante una balanza electrónica Electrolux KS05P (Estocolmo, Suecia). Para cada medición, la balanza se colocó sobre una plancha cerámica plana-nivelada y se utilizó un contenedor plástico para albergar cada una de las muestras a pesar (Figura 15). El contenedor plástico se limpió con una franela de tela después de cada medición.



Figura 15. Instalación de las áreas de control a nivel de piso y de las estanterías con las bandejas a tres niveles para el experimento de gran escala para el análisis comparativo de las cuatro marquesinas estudiadas en Aprocel. Se muestra también las áreas de la marquesina con la distribución de producto utilizado como simulación de carga dentro de cada sistema.

Tras la ejecución de estas tareas metodológicas, el equipo científico de BDA verifica un grado leve de estratificación horizontal y vertical en las marquesinas del tipo túnel y que cuentan con ventilación mecánica (M1 y M2). Se observa que la activación del sistema de ventilación mecánica no provoca cambios significativos en las condiciones de temperatura y humedad relativa dentro de las marquesinas. Para el caso de las marquesinas M1 y M2 se pudo determinar que durante la primera noche de secado se produce un fenómeno de condensación pronunciado. Los condensados que se acumulan sobre la superficie del plástico de la marquesina escurren paulatinamente hacia el cacao extendido sobre el área de secado promoviendo la formación de hongos y moho, ambos claramente identificables luego de la primera noche de secado (ver Figura 16). Un ciclo posterior de análisis del proceso de secado con 60 horas de duración permitió confirmar que la activación del generador de energía térmica (en la M1) y del sistema de ventilación mecánica (en la M2) redujo el fenómeno de condensación, dando paso a un proceso de deshidratación progresivo. Vale la pena indicar que el fenómeno de condensación es visiblemente menor en las marquesinas que cuentan con aberturas para facilitar la ventilación natural (M3 y M4).

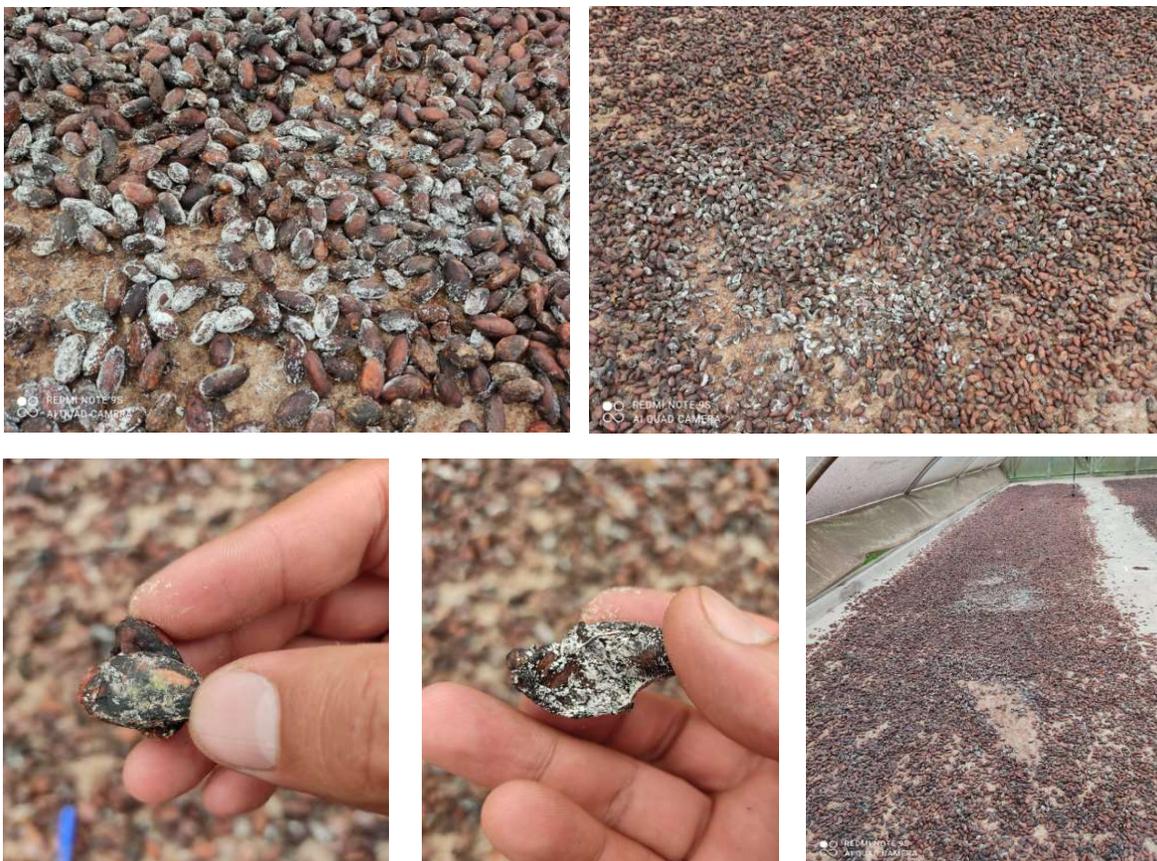


Figura 16. Formación de hongos y moho en el cacao luego de la primera noche de secado en la marquesina 1.

En los ciclos experimentales ejecutados (100 h y 60 h) se verifica que la activación del generador de energía térmica altera significativamente las curvas de temperatura y humedad relativa dentro de la M1 reflejando la capacidad de acondicionamiento del ambiente interno de la marquesina del sistema. No obstante, la humedad extraída del cacao colocado dentro de las áreas de control difiere en apenas 3 wt% en relación con el resto las de marquesinas estudiadas (M2, M3 y M4). Ocurre algo similar al comparar la M2 con las marquesinas que cuentan con ventilación natural (M3 y M4). Se verifica que la humedad extraída durante el proceso de secado en las marquesinas M2, M3 y M4 es virtualmente la misma. Considerando que la M3 y M4 alcanzan este rendimiento sin el aporte de energía

externa, se considera que la implementación de los ventiladores en la M2 es infructuosa. Las observaciones realizadas sobre las marquesinas que cuentan con ventilación natural (M3 y M4) sugieren que las características constructivas de la M4 -del tipo chimenea- aparentemente favorecerían el proceso de secado. En ese sentido es importante aclarar que, aunque los datos obtenidos le asignen a la M4 una tasa de deshidratación y de ventilación muy discretamente superior que la M3, un análisis comparativo de estas dos marquesinas (M3-M4) es poco práctico. Las marquesinas M3 y M4 difieren significativamente en tamaño además de que su orientación geográfica contrapuesta influye en la interacción que cada una tiene con la radiación solar incidente. Bajo estas condiciones, no es posible emitir un juicio categórico respecto de la factibilidad de un diseño constructivo por sobre otro.

A partir de los ciclos de secado analizados en la M1, el equipo consultor verifica que la activación combinada del generador de energía térmica y del sistema de ventilación mecánica permiten extraer apenas un 3 wt% más de humedad en relación con el resto de las marquesinas. Una posible alternativa para compensar el aporte energético adicional en la M1 (ventilador + quemador) sería incrementar la carga de la marquesina. Sin embargo, elevar la capacidad de carga de la M1 requeriría la implementación de bandejas de secado de al menos 3 niveles en toda el área disponible dentro de la misma. Esta acción requeriría también la implementación de una infraestructura similar en la M3 para la validación experimental de esta hipótesis mediante un ensayo en simultáneo. Es importante notar que la configuración actual del sistema de generación de energía térmica (ducto único para inyección de aire caliente adjunto al domo superior de la marquesina) responde a un criterio de minimización de costos de infraestructura. No obstante, los datos obtenidos confirman que la eficiencia del sistema de generación de energía térmica se encuentra comprometida, pues el acondicionamiento del ambiente interno de la marquesina parece tener un efecto exiguo sobre la tasa de deshidratación. Las observaciones de campo sugieren que el sistema de generación de energía térmica estudiado podría obtener un mejor desempeño aplicando el aire caliente a través de una malla perforada, directamente sobre el producto a secar tal como se ejecuta en un secador mecánico. Los datos obtenidos sugieren que elevar el coeficiente de convección direccionando el aire de secado directamente contra el producto tendría mayor influencia sobre la tasa de deshidratación que el mero acondicionamiento del ambiente externo. De esta manera se incrementarían los coeficientes de transferencia de calor y masa a la vez que se reducirían las pérdidas de energía hacia el exterior de la unidad de secado.

10.1.1. Suministro de energía con un sistema de generación fotovoltaico: simulación y análisis preliminar

De manera complementaria el equipo científico de BDA ha explorado las características y costos potencialmente asociados a un conjunto fotovoltaico (paneles solares) que suministraría energía eléctrica al sistema de extracción de aire mecánico utilizado en las marquesinas M1 y M2 (ver Figura 12). Para esto, el equipo científico de BDA ha estructurado una simulación por computadora mediante el software RETScreen® considerando ficheros climáticos de referencia (Puyo y Zamora). Se considera que cada marquesina dispone de dos extractores de aire de flujo axial (14", 220 VAC). Cada extractor ofrece un flujo de 9500 m³/h (sin pérdida de carga) y tiene una potencia de 0.25 kW_e. Se observa que para suministrar la energía consumida por estos extractores durante 5 horas diarias a través de un sistema fotovoltaico se requieren 8 paneles (silicio monocristalino, 150W_p) y un área de 7.8 m². El costo preliminar del sistema fotovoltaico (paneles, regulador y batería) a fecha 06.05.2020 es de 5192.5 USD. La Figura 17 muestra el resumen de resultados de la simulación por computador generada.

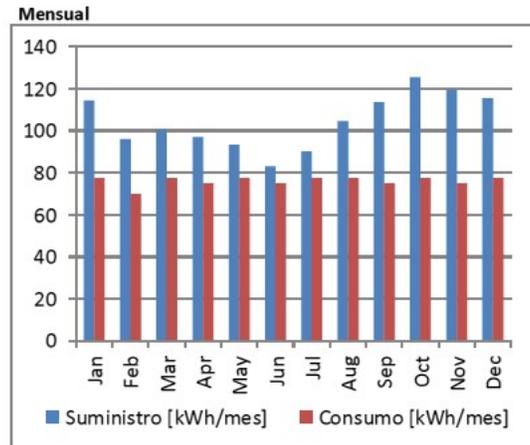


Figura 17. Resultados de la simulación por computador de un conjunto fotovoltaico (paneles solares) que suministraría energía eléctrica al sistema de extracción de aire mecánico utilizado en las marquesinas M1 y M2 en la organización APROCEL.

La premisa de arranque de este estudio pretendía valorar la factibilidad de consolidar un kit de *upgrade* para marquesinas, que permita monitorear la temperatura y humedad relativa interna y activar unos ventiladores para que acondicionen estos parámetros cuando sea pertinente. Así mismo, todos estos datos deberían registrarse en un módulo para posterior análisis y como aporte a los sistemas de trazabilidad. Inicialmente, CEFA albergaba la expectativa de que un kit de esta naturaleza podría alcanzar un costo de 2000 USD incluyendo los paneles solares. Tal como se indicó, únicamente el costo del sistema de generación eléctrica fotovoltaico necesario para alimentar los ventiladores es de 5192.5 USD. Es decir, en ese costo aún no están incluidos los costos de instalación, extractores/ventiladores, sensores (humedad y temperatura) ni tablero de control para almacenamiento de datos. Por lo tanto, el precio del sistema fotovoltaico superaría el precio referencial especificado por CEFA para la implementación de kits de ventilación mecánica con suministro de energía solar fotovoltaica (2000 USD por marquesina). De forma complementaria se indica que la simulación muestra que el costo de operación de los extractores de aire con suministro desde la red es de 22 centavos por día. Es decir, 80 USD por año según el perfil de carga considerado. Siendo que el valor del sistema fotovoltaico es de 5192.5 USD, se concluye que es más factible que el sistema de extracción de aire de las marquesinas opere conectado a la red nacional eléctrica (costo electricidad 0.09 ctvs/kWh; 93% renovable-hidroeléctrica).

10.2. Re-diseño y cálculo estructural de camas de secado

Como resultado de las observaciones y conclusiones discutidas en la Sección 10.1 el equipo científico y de ingeniería de BDA propone un diseño prototipo para una cama de secado que se podría implementar para optimizar el sistema híbrido de secado instalado en APROCEL. La cobertura de esta cama de secado debería incorporar una estructura plástica con aberturas para ventilación natural, similar a la utilizada en las marquesinas M3 o M4, de modo que la radiación solar se pueda aprovechar en los periodos diurnos. Es decir, la cama de secado propuesta quedaría bajo la actual cobertura plástica de la marquesina manteniendo el criterio de un sistema híbrido (solar + biomasa). La Figura 18 muestra el plano de la cama de secado diseñada y propuesta por el equipo científico de BDA.

Tabla 14.- Especificaciones técnicas definidas por el equipo científico y de ingeniería de BDA para la elaboración de una cama de secado y el re-diseño del sistema de secado híbrido implementado en la organización APROCEL

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
<p>Especificaciones generales</p> <p>Cada módulo de secado tiene 6 metros de largo y 2 metros de ancho</p> <p>Cada módulo incorpora una cámara de aire con 30 cm de alto.</p> <p>El lecho de secado (distancia por sobre la plancha de inox) tiene una altura máxima de 30 cm</p> <p>Cada módulo tiene dos compuertas de descarga de producto de 80x30 cm</p> <p>Las planchas de acero inoxidable se montan sobre una estructura metálica con soportes de 20x40 cm</p> <p>La estructura metálica de cada módulo es revestida con paneles de acero galvanizado</p> <p>La estructura metálica de la cama de secado considera la aplicación de fondo de protección y pintura anticorrosiva en dos capas</p> <p>La superficie de secado incorpora planchas de acero inoxidable de 1.5mm de espesor y perforaciones de 5mm de diámetro</p> <p>Los módulos se instalarán dentro de una marquesina (12x15 mts aprox) en la asociación APROCEL en Lago Agrio</p> <p>Cada módulo incluye la aplicación de espuma expansiva para sellado hermético entre la cámara de aire y el contrapiso.</p> <p>Se consideran dos tipos de módulos con características diferenciadas "custom" (módulo A y módulo B)</p> <p>Modulo A</p> <p>Módulo acoplado al generador de energía térmica renovable</p> <p>Incluye manifold (múltiple de conexión) bridado entre módulo de secado e intercambiador de calor</p> <p>Incluye aislamiento térmico (espesor 1.5 cm) en ducto de conexión entre intercambiador de calor y módulo de secado</p> <p>Incluye dos guillotinas removibles sobre el lecho de secado para dividir el área de secado en 2 secciones</p> <p>Incluye una guillotina en la cámara de aire para dividir el módulo A y el módulo B</p> <p>Incluye dos ventoleras con bisagra de 3x0.30 metros para facilitar el secado por convección natural</p> <p>Modulo B</p> <p>Incluye el montaje de 4 ventiladores axiales (Tipo MF1425, 1/2 HP, 14 inch) sobre la sección exterior de la cama de secado</p> <p>Incluye el montaje de 4 cubre lluvias para los ventiladores axiales (Tipo MF1425, 1/2 HP, 14 inch)</p> <p>La activación de los ventiladores se ejecutará agrupando en un mismo circuito 2 unidades</p> <p>Incluye 4 tapas empernadas para ubicarlas alternativamente sobre la posición de los ventiladores unificando los módulos A y B en un solo secador de 12x2 metros</p> <p>Incluye dos ventoleras con bisagra de 2x0.30 metros para promover el secado por convección natural</p> <p>Otros</p> <p>Incluye instalaciones eléctricas complementarias para el suministro de los 4 ventiladores</p> <p>Incluye reubicación de 3 módulos de sensado de temperatura y humedad relativa</p> <p>Incluye modificaciones y alteraciones en el tablero de control electrónico (PLC's) necesarias para la operatividad del sistema</p> <p>Modos operativos</p> <p>La configuración operativa planteada le brinda a la organización APROCEL la posibilidad de configurar diversas estrategias de secado y evaluar su efectividad</p> <p>Evaluar una operación de secado híbrida, que recurre a energía solar y a biomasa (agro-residuos) como fuentes de energía</p> <p>Evaluar la operación de una cama de secado artificial ubicada dentro de un secador solar del tipo marquesina</p> <p>Evaluar la operación de una cama de secado artificial por tramos de 3 metros ubicando una guillotina (zona secado y pre secado)</p> <p>Reducción en tiempos de secado mediante el control intencionado de los fenómenos convectivos en la marquesina, tanto a nivel de piso como en los módulos A y B regulando la altura de las láminas plásticas laterales y la apertura de las ventoleras ubicadas en la sección lateral de los módulos A y B.</p> <p>Evaluar la factibilidad de una manga de secado de 12x2 m, en tramos de 3 y 6 metros mediante la guillotina de la cámara de aire</p> <p>Evaluar la efectividad de secado, mediante la activación de ventilación mecánica forzada a temperatura ambiente (módulo de secado B)</p> <p>Mezcla de caudales: se podrá alimentar aire a los módulos de secado de manera simultánea desde la turbina del generador de calor y las unidades de ventilación del módulo B (la guillotina en la cámara de aire permite integrar los módulos A y B).</p>

El rediseño de la marquesina propuesto por el equipo científico y de ingeniería de BDA sobre la posición de las marquesinas M1 y M2 ya implementado en la organización APROCEL se muestra a continuación en la Figura 19. Cabe aclarar que la construcción de esta infraestructura no estuvo a cargo de BDA.



Figura 19. Sistema híbrido de secado actualmente instalado en la organización APROCEL.

Es pertinente indicar que BDA, sobre la base de las experiencias adquiridas en la implementación de la tecnología de conversión de biocombustibles sólidos derivados de agro residuos, ha desarrollado un conjunto innovaciones en términos constructivos y de rendimiento de las camas de secado. Esta innovaciones incluyen: i) el uso de guillotinas que permiten usar las camas de secado por secciones conforme la disponibilidad de material, ii) la integración de difusores con efecto Venturi debajo de la cama de secado para garantizar una distribución homogénea del flujo de aire y de la tasa de deshidratación en todas las zonas de la cama de secado, iii) refuerzos estructurales que garantizan duración a largo plazo y carga apropiada, iv) compuertas ergonómicas para la manipulación del material y mantenimiento de la cama de secado, v) aislamientos en espuma sintética para garantizar estanqueidad y más. Un detalle de las características constructivas de las camas de secado implementadas por BDA en KALLARI y ASOMACHE se pueden consultar en los siguientes enlaces: <https://youtu.be/Pq4Namei4E8> y <https://www.youtube.com/watch?v=UoJggLzf-CY>.

10.3. Ajuste volumétrico de turbinas para el proceso de secado.

De acuerdo con las observaciones y conclusiones determinadas en el estudio ejecutado por el equipo científico de BDA, se ha concluido que el mayor “driver” del proceso de secado estaría vinculado con la tasa de convección implementada durante el proceso (ver Sección 10.1). El estudio descrito en la Sección 10.1 muestra claramente que

el efecto de incrementar la temperatura en el proceso de secado no reporta reducciones ni afecta los tiempos de secado significativamente. En este sentido, BDA ejecutó por cuenta propia y con presupuesto particular un estudio pormenorizado sobre los fenómenos de transferencia de calor y masa vinculados a la deshidratación de cacao. En particular, el interés de BDA ha sido determinar el flujo volumétrico idóneo que se debe suministrar a cada grano de cacao sobre la mesa de secado, para dinamizar el proceso de transferencia de masa (extracción de humedad) y reducir al máximo los tiempos de secado. La Figura 20 muestra las curvas dinámicas de flujo volumétrico de las turbinas utilizadas por BDA en los sistemas de secado implementados.

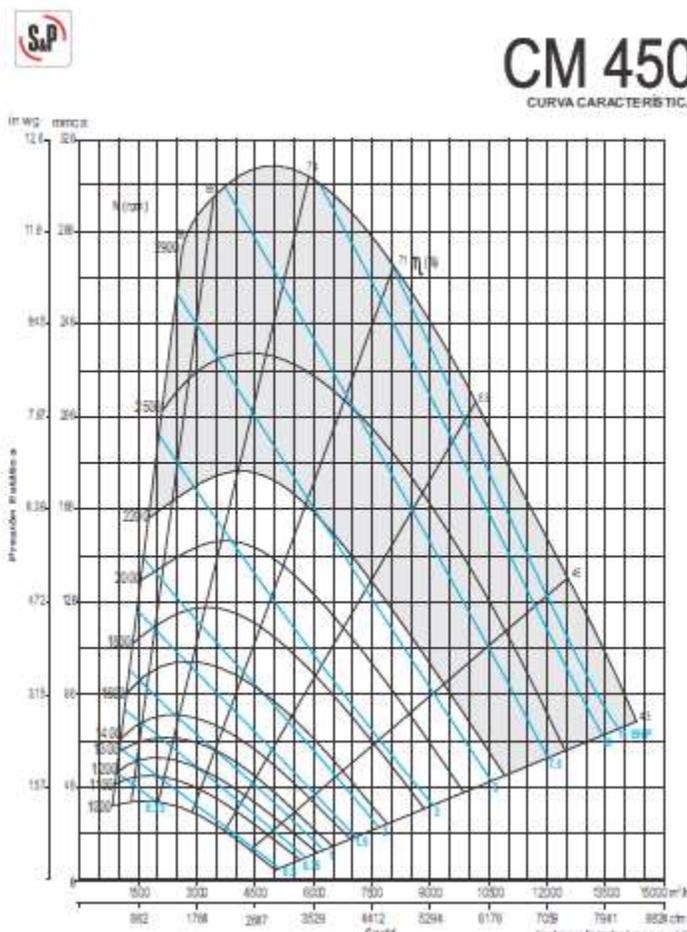


Figura 20. Curva de rendimiento característica de la turbina Soler&Paulau modelo CM 450, airfoil (5HP).

Sobre la base de estas informaciones, se implementó en ASOMACHE dos kits de poleas prototipo en el que se opera la turbina a un flujo volumétrico correspondiente a 1600 y 1350 RPM. La configuración habitual de estos sistemas ha sido operar la turbina con un flujo volumétrico correspondiente a 1100 RPM. La Figura 21 muestra la implementación y pruebas de funcionamiento de estos ajustes de mejora realizados por el equipo técnico y científico de BDA en la organización ASOMACHE. De manera preliminar, los resultados en campo recogidos en ASOMACHE muestran que el ajuste volumétrico de la turbina permitiría reducir los tiempos de secado en un 40-60%. BDA ha hecho disponible este kit de *upgrade* para que todas las organizaciones intervenidas puedan instalarlo, reducir sus tiempos de secado y mejorar el rendimiento y eficiencia de sus operaciones.



Figura 21. Ajuste volumétrico y de rendimiento de la turbina Soler&Paulau modelo CM 450, airfoil (5HP) ejecutado por el equipo técnico de BDA en campo. Presupuesto y partida propia.

11. Conclusiones

En el sector agroindustrial de pequeña escala ecuatoriano, la energía térmica requerida por los procesos de post cosecha -en particular los procesos de secado mecánico- se ha generado utilizando combustibles fósiles subsidiados como diésel y GLP. Recientemente, el incremento de los precios de estos combustibles, que resultan de los ajustes practicados por el gobierno sobre la política de subsidios, ha provocado un incremento de los costos de secado para las organizaciones de agricultores que acopian, procesan y comercializan café, cacao y demás. La start-up ecuatoriana de base científica Bioenergía de los Andes (BDA) ha conceptualizado, diseñado, construido y puesto en marcha a nivel de laboratorio -escala piloto- una tecnología de conversión termoquímica capaz de generar energía térmica utilizando agro residuos como biocombustible. De este modo, es posible reemplazar vectores energéticos de origen fósil como el diésel y el GLP típicamente utilizados para producir energía térmica en los procesos de post cosecha. En este contexto, CEFA y BDA han conjugado recursos e intenciones para que esta tecnología pueda ser transferida desde el seno académico hacia la agroindustria donde pueda ponerse a prueba bajo condiciones de operación agresivas y con carga real. Esta cooperación ha tenido como propósito implementar esta tecnología para que las asociaciones de productores utilicen agro-residuos como biocombustible sólido para generar la energía térmica requerida por los procesos de secado artificial, evitando el consumo de diésel y GLP y reduciendo los costos operativos de los centros de acopio.

Se ha instalado este tipo de tecnología en cinco asociaciones de productores del norte de la amazonia y Manabí en tres versiones diferentes. El análisis experimental y de campo ejecutado por BDA permite concluir que el quemador de lecho fijo y propagación de llama horizontal reporta la mayor eficiencia y fiabilidad operativa. Así mismo, este tipo de reactor reporta el menor impacto en términos de la composición del efluente gaseoso. Cabe destacar que todo el análisis de eficiencia y emisiones se ha ejecutado siguiendo la normativa de ecodiseño europea EU 2015/1188-89 L193/76-100. Para este tipo de reactor, la concentración de monóxido de carbono en el efluente está siempre por debajo del límite de 500 mg/Nm³ especificado por la normativa europea. Este rendimiento se alcanza cuando se utilizan agro-residuos del sector de palma africana como biocombustible, a saber, cuesco de

palma africana y pellets de fibra de mesocarpio. BDA ha verificado que el uso de esta tecnología, en promedio, les ahorra a las asociaciones entre 5.5 y 9.6 USD por cada hora de operación del secador. Así mismo, se ha verificado que las asociaciones beneficiadas evitan la emisión de aproximadamente 200 kg de CO₂ por cada hora de operación del secador. En Ecuador, un proyecto típico de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero tiene un costo de inversión en infraestructura energética de alrededor de 3000 USD por tonelada de CO₂ reducida al año. En el caso de la tecnología implementada por CEFA y BDA, la inversión en infraestructura energética tiene un promedio de 230 USD por tonelada de CO₂ reducida al año.

BDA ha sido responsable del diseño de los protocolos experimentales necesarios para la evaluación en campo de la eficacia e impactos ambientales y económicos que genera esta tecnología. Estas metodologías de investigación experimental y teórica tienen singular valor pues se adaptan al contexto rural en que se ubican estas intervenciones tecnológicas. Es destacable que, a pesar de las limitaciones presupuestarias y aquellas propias del sector rural, todos estos análisis siguen estrictos protocolos científicos, dando lugar a una infraestructura de laboratorio itinerante e inédita que ha permitido -además de evaluar el desempeño de la tecnología- establecer un contacto más cercano entre científicos, el medio rural y sus ciudadanos. Es importante también señalar que estas metodologías experimentales han permitido ensayar y evaluar la implementación práctica de un modelo de bioeconomía más allá de la teoría y las reflexiones retóricas típicas de la academia y las instituciones de asistencia internacional. Con modestos recursos, CEFA y BDA han implementado un modelo viable y rentable de bioeconomía para el sector rural en el que los residuos agrícolas -que no tenían un uso práctico definido- se han transformado en recursos (biocombustibles sólidos y enmiendas de suelo para el caso de la ceniza) que brindan independencia energética de las asociaciones fortaleciéndolas frente a la remoción paulatina del subsidio que otorgaba el gobierno al uso de combustibles fósiles. Este modelo de bioeconomía reduce las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a los procesos de post cosecha incrementado además la rentabilidad de estas operaciones. En este sentido, las experiencias acumuladas por CEFA y BDA en la integración de modelos de bioeconomía en asociaciones de agricultores que operan en ecosistemas frágiles, como la Amazonia, merecen ser consideradas, estudiadas y ampliadas a otros sectores, regiones y países.

Desde la primera implementación realizada en marzo de 2018, la tecnología que nos convoca en este informe ha madurado y se ha robustecido constituyendo un dispositivo tecnológico con inestimable valor científico y social que aglomera una serie de esfuerzos de investigación e ingeniería. Se ha servido, por lo tanto, propósitos de desarrollo y fortalecimiento comunitario, mitigación de cambio climático, protección de ecosistemas frágiles, así como de innovación, avance y progreso científico. En parte, estos resultados tienen que ver con la inversión decidida de BDA en el montaje de una infraestructura de investigación independiente junto con una estructura organizacional para la atención post venta que ha permitido proporcionar de forma integral los servicios de mantenimiento y piezas de repuesto vinculadas a la tecnología y los servicios de capacitación y entrenamiento a operadores. A pesar de tratarse de una microempresa emergente, BDA no ha escatimado recursos para brindar todos los servicios demandados por CEFA y las organizaciones en cualquier lugar del territorio nacional. BDA ha movilizado su personal y todas las herramientas necesarias para dar soporte a la tecnología a pesar de las limitaciones, ubicaciones, estado vial, distancias de viaje, expendios y riesgos laborales que esto implica. De esta manera, BDA y CEFA han demostrado que es posible incorporar tecnología moderna de operación completamente automatizada y con altísima eficiencia operacional y energética en centros de acopio operados por asociaciones de campesinos y agricultores del sector rural ecuatoriano.

En este apartado, es de fundamental importancia indicar que las asociaciones beneficiadas han obviado y evadido de forma consciente la responsabilidad, no solo de adquirir el biocombustible que de por sí es más barato que el

diésel subsidiado, sino que también han recusado el pago de importes y gastos vinculados a la ejecución -a domicilio- de los mantenimientos preventivos que una tecnología de estas características demanda. A este respecto, BDA ratifica que la operación futura y estable de la tecnología, que en definitiva implica el sostenimiento de los beneficios ambientales y económicos resultantes, exige que las asociaciones beneficiadas destinen un presupuesto apropiado que cubra la ejecución de los protocolos de mantenimiento preventivo que tienen que efectuarse cada 250 horas de operación o 3 meses, lo que primero ocurra. Se ha demostrado y documentado con solvencia, claridad y en términos cuantitativos, que el ahorro en costos de combustible que tienen las organizaciones (entre 5.5 y 9.6 USD **por cada hora** de operación del secador) es suficientemente amplio como para que una fracción de esa rentabilidad se destine al mantenimiento preventivo de la tecnología. Al igual que cualquier maquinaria de producción industrial, la tecnología implementada por BDA requiere servicios de mantenimiento periódicos y programados. A este respecto, cabe señalar que el establecimiento de una relación de intercambio de servicios post venta entre las asociaciones y el proveedor de tecnología BDA es saludable. De otro modo, es pronosticable que, ante la falta de un flujo armonioso y equitativo de servicios entre estos actores, la tecnología perderá fiabilidad y eficacia. Se debe comprender que al igual que cualquier fabricante de tecnología y equipos, BDA planifica la sostenibilidad de sus operaciones en base a los ingresos potencialmente generados por los servicios post venta (mantenimiento, reparaciones y repuestos). Por lo tanto, la falta de una relación de intercambio de servicios entre BDA y las asociaciones colocará en grave riesgo la operatividad a largo plazo de esta tecnología e inclusive de BDA como microemprendimiento emergente.

12. Bibliografía

- [1] Asamblea Constituyente, *Constitución del Ecuador - 2008*, vol. 449. Montecristi, 2008.
- [2] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, “Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035,” 2017. [https://www.celec.gov.ec/hidronacion/images/stories/pdf/PLANEE version espa%F1ol.pdf](https://www.celec.gov.ec/hidronacion/images/stories/pdf/PLANEE_version_espa%F1ol.pdf).
- [3] OLADE, “Anuario 2021 de Estadísticas Energéticas,” Organización Latinoamericana de Energía, Quito - Ecuador, 2022. [Online]. Available: <http://www.olade.org/publicaciones/anuario-estadisticas-energeticas-2017/>.
- [4] T. Mitschke, “Desarrollo de análisis de mercado nacional e internacional de los productos de pellet,” Quito, 2016. [Online]. Available: [https://www.dropbox.com/s/spivnh6mrvk7srk/Mitschke - 2016 - Desarrollo de análisis de mercado nacional e internacional de los productos de pellet.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/spivnh6mrvk7srk/Mitschke-2016-Desarrollo-de-analisis-de-mercado-nacional-e-internacional-de-los-productos-de-pellet.pdf?dl=0).
- [5] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, “ATLAS Bioenergético de la República del Ecuador,” Quito, 2014.
- [6] N. Valev, “Global Petrol Prices,” *Precios del diésel, litro*, 2022. https://es.globalpetrolprices.com/diesel_prices/ (accessed Jul. 06, 2022).
- [7] I. Soto, C. Ellison, M. Kenis, B. Diaz, B. Muys, and E. Mathijs, “Why do farmers abandon jatropha cultivation ? The case of Chiapas, Mexico,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 42, pp. 77–86, 2018.
- [8] F. Schaffitzel, M. Jakob, R. Soria, A. Vogt-Schilb, and H. Ward, “Can government transfers make energy subsidy reform socially acceptable? A case study on Ecuador,” 2019. [Online]. Available: <https://publications.iadb.org/es/pueden-las-transferencias-del-gobierno-hacer-que-la-reforma-de-los-subsidios-energeticos-sea>.
- [9] K. Troncoso and A. Soares, “LPG fuel subsidies in Latin America and the use of solid fuels to cook,” *Energy Policy*, vol. 107, no. 8, pp. 188–196, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.04.046.

- [10] G. M. L. Mario A. Heredia Salgado., Jonathan A. Coba S., “Bioenergía de los Andes,” *Refinamiento térmico de agroresiduos*, 2022. <https://marioherediasalgad.wixsite.com/my-site-1>.
- [11] Mario A. Heredia Salgado, “Cuesco de palma africana , un nuevo combustible para uso comercial en Ecuador : análisis económico y evidencia experimental,” Quito - Ecuador, 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.19364.07042.
- [12] M. Saenger, E. Hartge, and J. Werther, “Combustion of coffee husks,” *Renew. Energy*, vol. 23, no. 9, pp. 103–121, 2001.
- [13] L. Bieri, M. Classen, S. Gutzwiller, A. Lukacs, and M. Schmid, “Pulpa Pyro Peru Generacion de biocarbono y energia de pulpa de cafe en Peru,” Zurich, 2012.
- [14] M. A. Heredia Salgado, L. A. . Tarelho, M. A. A. Matos, D. Rivadeneira, and R. A. Narváez C, “Palm oil kernel shell as solid fuel for the commercial and industrial sector in Ecuador: tax incentive impact and performance of a prototype burner,” *J. Clean. Prod.*, vol. 213, no. March, pp. 104–113, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.133.
- [15] M. A. Heredia Salgado, L. A. C. Tarelho, D. A. Rivadeneira-Rivera, V. Ramirez, and D. Sinche, “Energetic valorization of the residual biomass produced during *Jatropha curcas* oil extraction,” *Renew. Energy*, vol. 146, no. February, pp. 1640–1648, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.154>.
- [16] D. T. Pio, L. A. C. Tarelho, and M. A. A. Matos, “Characteristics of the gas produced during biomass direct gasification in an autothermal pilot-scale bubbling fluidized bed reactor,” *Energy*, vol. 120, pp. 915–928, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.11.145.
- [17] Mario A. Heredia Salgado, I. Säumel, A. Cianferoni, and L. A. C. Tarelho, “Potential for Farmers’ Cooperatives to Convert Coffee Husks into Biochar and Promote the Bioeconomy in the North Ecuadorian Amazon organizations,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 4747, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/app11114747>.
- [18] European Biochar Foundation (EBC), “Guidelines for a Sustainable Production of Biochar,” Arbaz, Switzerland, 2018. doi: 10.13140/RG.2.1.4658.7043.
- [19] Mario A. Heredia Salgado, “Biomass thermochemical conversion in small scale facilities,” Aveiro University, 2020.
- [20] M. A. Heredia Salgado, J. A. Coba S, and L. A. C. Tarelho, “Simultaneous production of biochar and thermal energy using palm oil residual biomass as feedstock in an auto-thermal prototype reactor,” *J. Clean. Prod.*, vol. 266, no. 266, p. 121804, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121804.
- [21] The engineering toolbox, “Higher and lower calorific values for some common fuels,” *Fuels*, 2018. .
- [22] D. Woolf, J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, and S. Joseph, “Sustainable biochar to mitigate global climate change,” *Nat. Commun.*, vol. 1, no. 5, 2010, doi: 10.1038/ncomms1053.
- [23] International Energy Agency, “Methane Tracker 2021,” Paris, 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2021>.
- [24] R. Zambrano, “Cien toneladas anuales de CO2 reduciría el proyecto fotovoltaico bananero más grande de Ecuador,” *El Universo*, Guayaquil - Ecuador, 2021.