

RETO # 3

¿Cómo podríamos demostrar los procesos de gasificación de residuos del cultivo y procesamiento de arroz con alto contenido de cenizas para obtener un desarrollo de análisis técnico-económico de su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica?

DATOS BÁSICOS DEL RETO**Descripción corta del reto**

Se requieren propuestas de tecnologías para la gasificación de biomasa con alto contenido de cenizas en Colombia como la paja y cascarilla resultantes en el procesamiento del arroz. Esta tecnología de gasificación debe permitir validar, en un entorno relevante, la producción de syngas y realizar un análisis técnico-económico de dicho proceso. Con ello, se busca facilitar la toma de decisiones a partir de esta alternativa sobre el escalamiento y la valorización del syngas para la generación de energía eléctrica, con el fin de diversificar y complementar la matriz energética nacional.

Las soluciones deberán incrementar el rendimiento del proceso de gasificación para la producción de syngas al menor costo operativo (Opex) mediante el uso de una tecnología de gasificación de los residuos del cultivo y procesamiento del arroz con alto contenido de cenizas, garantizando un contenido energético elevado, asociado a una composición del syngas con mayor composición de hidrógeno y monóxido de carbono. Se esperan tecnologías robustas y con alto potencial de escalamiento industrial, que fortalezcan las alternativas de generación de energía eléctrica en procesos industriales contribuyendo al cumplimiento de las metas de descarbonización y eficiencia operacional de ECOPETROL S.A.

Fuente de financiación

Recursos provenientes del Acuerdo de Cooperación, AC No. 1 (3054658) celebrado entre Ecopetrol S.A y la Cámara de Comercio de Cali.

Valor total

Máximo \$ 210 millones de pesos colombianos (COP) como incentivo a entregar al innovador, para efectos de la ejecución del piloto en ambiente relevante.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**Población Afectada**

Sector agroindustrial de procesamiento de arroz en Colombia

Línea Base

Colombia produjo 3.501.847 toneladas de arroz paddy verde en 2024 ²³, generando 4,72 millones de toneladas de paja y más de 700 mil toneladas de cascarilla anuales¹.

El arroz representa uno de los cultivos agrícolas de mayor relevancia en Colombia, tanto por su importancia en la seguridad alimentaria como por su contribución al desarrollo del sector rural. En 2024, Colombia registró un área sembrada de arroz mecanizado de 631.071 hectáreas, con una producción total de 3.501.847 toneladas de arroz paddy verde, lo que representó un incremento del 7,0% en área y del 3,3% en producción respecto al año anterior. El rendimiento promedio nacional se ubicó en 5,58 t/ha, con departamentos como Huila (7,37 t/ha) y Tolima (6,94 t/ha) destacándose por encima del promedio, gracias a su alta tecnificación e infraestructura de riego. Las principales regiones productoras fueron Casanare (35,6%), Tolima (20,6%) y Meta (14,0%), que en conjunto concentran más del 70% de la producción nacional²³.

En términos de productividad comparada, Colombia se encuentra por debajo del referente mundial que representa China, mayor productor de arroz a nivel global, con una producción de 207,5 millones de toneladas en 2024 y rendimientos que superan las 7,0 t/ha. Esta brecha evidencia el potencial de mejora productiva del sector arrocerero colombiano mediante la adopción de variedades de alto rendimiento, optimización del manejo agronómico y ampliación de la infraestructura de riego.

El procesamiento industrial del arroz genera dos tipos principales de residuos de biomasa con alto potencial de valorización energética: la paja de arroz y la cascarilla. Aplicando los factores de generación establecidos en la literatura técnica, -con relación paja/grano- de 1,35 toneladas de paja por cada tonelada de arroz paddy, y -relación cascarilla/grano- de 0,20 toneladas de cascarilla por tonelada de arroz paddy. Sobre la producción nacional

de 2024⁴, se estima una generación de 4,72 millones de toneladas de paja y más de 700 mil toneladas de cascarilla anuales. Estos volúmenes posicionan a Colombia como un generador relevante de biomasa residual lignocelulósica en el contexto latinoamericano.

Tradicionalmente, la paja de arroz ha sido utilizada de forma limitada, principalmente incorporada al suelo para mejorar la materia orgánica o, en prácticas no sostenibles, dispuesta mediante quema a campo abierto; sin embargo, en los últimos años ha despertado interés como materia prima para procesos de valorización energética y producción de biocombustibles. Por su parte, la cascarilla de arroz presenta usos tradicionales en cama para el beneficio de animales y aprovechada como combustible en calderas industriales, insumo para la generación de energía térmica y eléctrica, así como materia prima para la obtención de ceniza rica en sílice empleada en la industria cementera y cerámica.

Los residuos del cultivo de arroz — cascarilla y paja — constituyen una fuente significativa de biomasa lignocelulósica con alto potencial para la valorización energética mediante gasificación. Su composición fisicoquímica, caracterizada por proporciones variables de celulosa, hemicelulosa y lignina, junto con contenidos relevantes de humedad, cenizas y materiales volátiles, determina directamente la cinética del proceso termoquímico.

La transición energética global y las metas de descarbonización han posicionado a la bioenergía como un pilar fundamental de las matrices energéticas sostenibles. En Colombia, país con amplia disponibilidad de biomasa residual proveniente de los sectores agrícola, forestal e industrial, la gasificación se consolida como una tecnología escalable para la producción de energía eléctrica limpia a partir de residuos.

La gasificación es un proceso termoquímico de descomposición de biomasa carbonosa mediante oxidación parcial a temperaturas elevadas (800–1400 °C), que produce gas de síntesis (syngas), compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂)⁵. Este syngas puede derivarse de diversas fuentes carbonáceas —carbón, coque de petróleo y biomasa— y, cuando proviene de esta última, se denomina biosyngas⁶. Su aplicabilidad abarca desde la generación de calor y electricidad hasta la síntesis de combustibles y productos químicos de alto valor.

No obstante, la eficiencia del proceso está condicionada por múltiples factores interrelacionados. En primer lugar, las propiedades fisicoquímicas de la materia prima —composición lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa, lignina), contenido de humedad, cenizas y materiales volátiles— determinan directamente la cinética de gasificación. Humedades superiores al 20% reducen la eficiencia térmica al incrementar el consumo energético en evaporación, lo que hace necesario aplicar pretratamientos de secado (hasta <10–15% de humedad), reducción de tamaño de partícula (<5 mm en lechos fluidizados) y torrefacción (200–300 °C) para mejorar la reactividad del sustrato.

En segundo lugar, las condiciones operativas ejercen un papel determinante sobre la calidad del syngas. El proceso ocurre típicamente entre 700–1000 °C, con presiones desde la atmósfera hasta más de 20 bar en sistemas industriales. El parámetro crítico es la relación de equivalencia, usualmente entre 0,2–0,4, que regula el equilibrio entre combustión parcial y producción de gas. El agente gasificante empleado —aire, oxígeno o vapor— define la composición y el poder calorífico del syngas: con aire se obtienen valores de 4–7 MJ/Nm³, mientras que con oxígeno o vapor se alcanzan 10–18 MJ/Nm³⁷.

En tercer lugar, la formación de alquitrán (tar) constituye uno de los principales desafíos tecnológicos, ya que estas moléculas de hidrocarburos incombustibles comprometen la calidad del gas y la integridad de los equipos downstream. Su control requiere sistemas avanzados de acondicionamiento: ciclones para partículas mayores a 10 µm, filtros cerámicos para finos, y sistemas catalíticos de reformado que reducen el

¹ Pode, R., 2016. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53, 1468–1485.

² DANE, censo nacional arrocero. Webpage: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-arrocero?highlight=WyllbiJd>.

³ Fedearroz, área, producción y rendimiento. Webpage: <https://www.fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/area-produccion-y-rendimiento/>

⁴ Pode, R., 2016. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53, 1468–1485.

⁵ Sciencedirect definitions. Webpage: [Gasificación - una visión general | Temas de ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/syngas)

⁶ Sciencedirect definitions. Webpage: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/syngas>.

⁷ Muthu Dinesh kumar Ramaswamy, Mukilarasan Nedunchezhiyan, Senthil Sampath, Sathiyamoorthi Ramalingam, Thiruselvam Krishamoorthi, Kubilay Bayramoğlu. Advances, challenges, and future directions in biomass gasification: A critical review of feedstock, reactor designs, and process optimization, *Chemical Engineering Journal Advances* Volume 26, 2026, 101107, ISSN 2666-8211, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.101107>.

⁸ S.K. Sansaniwal, K. Pal, M.A. Rosen, S.K. Tyagi. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 72, 2017, Pages 363-384, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>.

contenido de alquitrán a menos de 100 mg/Nm³. La eliminación adicional de H₂S y CO₂ resulta indispensable para aplicaciones de alta exigencia como la síntesis Fischer-Tropsch o la producción de hidrógeno⁹.

Frente a estos retos, el estado del arte se orienta hacia configuraciones de reactor más eficientes. Los lechos fluidizados y de arrastre ofrecen mayor viabilidad frente al lecho fijo al generar syngas con menor contenido de alquitrán y mayor homogeneidad térmica. La gasificación en etapas representa el enfoque más prometedor, al separar físicamente los procesos de pirólisis y gasificación del CHAR, lo que permite optimizar cada etapa de manera independiente (secado, pirólisis, gasificación y reducción). Adicionalmente, la integración con ciclos combinados (BIGCC) y el uso de catalizadores para reformado in-situ han incrementado la fracción molar de H₂ y CO, mejorando el rendimiento global del sistema hasta en un 20–30%³⁴.

Estudios tecno-económicos indican que la integración de plantas de procesamiento de arroz con sistemas de gasificación constituye la opción más eficiente, con resultados prometedores en producción eléctrica y perspectivas de expansión hacia combustibles basados en H₂. Sin embargo, el alto contenido de sílice en la cáscara de arroz (cenizas >15%) introduce desafíos adicionales relacionados con la formación de escoria y la incrustación en superficies del reactor, lo que exige el diseño de sistemas especializados de remoción —reactores de escoria fundida o sistemas húmedos y secos de alta eficiencia— y una caracterización rigurosa de la biomasa como punto de partida para el diseño del proceso⁹.

En síntesis, aunque la gasificación de residuos arroceros cuenta con una base tecnológica consolidada, su implementación eficiente requiere abordar de forma integrada la variabilidad de la materia prima, las condiciones operativas óptimas, el control del alquitrán y la selección adecuada del tipo de reactor. La comprensión profunda de estos factores es condición necesaria para diseñar y operar sistemas de gasificación que conviertan estos residuos en syngas de alta calidad con bajo contenido de alquitrán.

Antecedentes

En ECOPETROL S.A únicamente se han adelantado estudios para conocer el know-how del proceso de gasificación y es necesario revisar con este desarrollo si tiene sentido económicamente o no la producción de energía a partir de estas biomásas.

La gasificación, como proceso termoquímico de conversión de biomasa y residuos en gas de síntesis, ha sido objeto de una intensa actividad inventiva a nivel global durante la última década. Una revisión de la base de datos Espacenet revela un conjunto diverso de temáticas protegidas, que abarca desde procesos de gasificación de biomasa y residuos, tecnologías de lecho fluidizado y lecho de arrastre, hasta sistemas de purificación y limpieza de Syngas, producción de combustibles líquidos y gaseosos, y el desarrollo de catalizadores y agentes de gasificación especializados. Esta diversidad refleja el carácter multidisciplinario del campo y el interés sostenido de la industria en superar las barreras técnicas que limitan la eficiencia y escalabilidad del proceso.

En cuanto a la distribución geográfica de la actividad de patentamiento, Estados Unidos lidera con el 35% de las patentes registradas, seguido por China (20%) y Japón (15%), que en conjunto concentran el 70% de la producción tecnológica global en este campo. Alemania (10%), Reino Unido (5%) y Francia (5%) completan el bloque de naciones con mayor actividad innovadora, mientras que Italia (3%), España (2%), Australia (2%) y Canadá (1%) representan contribuciones menores pero sostenidas. Esta distribución evidencia una marcada concentración del desarrollo tecnológico en economías con alta inversión en I+D y sólidas políticas de transición energética.

Entre las principales empresas titulares de patentes se destacan Air Liquide (Francia), Mitsubishi Heavy Industries (Japón), ANDRITZ (Austria), Thyssenkrupp AG (Alemania), Synthesis Energy Systems y Air Products (EE. UU.), GE (EE. UU.), EQTEC plc (Irlanda), Dakota Gasification Company (EE. UU.) y Larsen & Toubro Limited (India). La presencia de actores tanto de Europa, América del Norte y Asia refleja una competencia tecnológica global, con estrategias de protección intelectual orientadas a asegurar posiciones en mercados de energía renovable y combustibles sintéticos.

En el plano comercial y de escalamiento, varias de estas compañías han avanzado hacia la implementación de proyectos concretos. Air Liquide ha anunciado la construcción de una planta de gasificación de biomasa en Francia con una capacidad de 10 MW, mientras que Mitsubishi Heavy Industries ha desarrollado un proceso de gasificación de lecho fluidizado para la producción de combustibles líquidos con una capacidad de 100 barriles por día. Por su parte, ANDRITZ ha suministrado un sistema de gasificación de biomasa para una planta de generación de energía en Alemania con capacidad de 20 MW. Estos

⁹ Delivand, M.K., Barz, M., Gheewala, S.H., Sajjakulnukit, B., 2011. Economic feasibility assessment of rice straw utilization for electricity generating through combustion in Thailand. Appl. Energy 88 (11), 3651–3658.

casos ilustran la consolidación progresiva de la tecnología de gasificación en escenarios de aplicación real, transitando del desarrollo experimental hacia la operación comercial a escala industrial.

Una revisión sistemática en la base de datos Google Patents con el criterio de clasificación con código C10J3 (Production of combustible gases containing carbon monoxide from solid carbonaceous fuels) registradas en Colombia arrojó un total de 28 resultados que incluyen tanto patentes con origen de invención en Colombia como patentes internacionales de familias PCT/WO validadas o publicadas en el territorio colombiano. La revisión permitió identificar 4 brechas tecnológicas para los sistemas de gasificación en Colombia:

1. Capacidad inventiva nacional incipiente pero diversa. Se identifican tres patentes de origen colombiano (CO2017011719, CO2021016994, CO2020004451), que abarcan configuraciones de lecho fijo, lecho fluidizado y reactor multifásico continuo. Ninguna ha sido desarrollada por grandes empresas industriales, sino por inventores independientes y una institución universitaria, lo que indica que el campo de la gasificación de biomasa en Colombia se encuentra aún en etapa de I+D+i temprana.
2. Vacío tecnológico específico en residuos de la industria del arroz. Ninguna de las 28 patentes identificadas aborda específicamente la gasificación de cascarilla o paja de arroz como sustrato. Este vacío es el argumento de novedad más sólido para cualquier desarrollo tecnológico orientado a estos residuos en Colombia, tanto desde la perspectiva de la patentabilidad como de la pertinencia del problema de investigación.
3. Tendencia tecnológica dominante, gasificación en etapas y reactores integrados. Las patentes internacionales publicadas en Colombia convergen hacia configuraciones de etapas separadas de pirólisis y gasificación (CO2017005844, CO6541590, CO2022006136), que permiten optimizar independientemente cada subproceso. Esta tendencia, identificada también en la revisión de literatura científica, configura la dirección más prometedora para el diseño de sistemas eficientes de gasificación de biomasa lignocelulósica.
4. Protección activa del espacio tecnológico más avanzado por actores internacionales. Las patentes PCT publicadas en Colombia de ECN (Países Bajos), Lummus Technology (EE. UU.), RVLizenz AG (Suiza) y Thermo Technologies LLC (EE. UU.) cubren las soluciones más maduras en lecho fluidizado, gasificación en etapas y enfriamiento del syngas. Esto configura restricciones de libertad de operación que deben considerarse en el diseño de cualquier sistema nuevo, orientando el desarrollo colombiano hacia nichos no cubiertos, como la adaptación a sustratos de alta sílice (cáscara de arroz) o el diseño de sistemas a escala descentralizada para molinos arroceros rurales.
5. Oportunidades de innovación identificadas. Los vacíos técnicos detectados en el conjunto de patentes revisadas incluyen: (i) ausencia de reivindicaciones sobre manejo de sustratos con >15% de cenizas de sílice; (ii) falta de sistemas diseñados para escala pequeña (<500 kW) adecuada para integración en molinos arroceros colombianos; (iii) ausencia de configuraciones optimizadas para condiciones tropicales (alta humedad ambiente, biomasa con variabilidad estacional); e inexistencia de patentes sobre co-gasificación de mezclas paja-cascarilla de arroz. Estos vacíos definen el espacio de innovación disponible y pertinente para Colombia.

ALCANCE

ALCANCE			
Objetivo General	Contribuir a la descarbonización y eficiencia operacional por medio de una tecnología que permita determinar la viabilidad técnico-económica del proceso de gasificación de residuos del cultivo y procesamiento del arroz con alto contenido de cenizas para generar nuevas alternativas de generación de energía eléctrica e hidrógeno renovable.	Indicador y meta	Costo total instalado ¹⁰ ≤3000 USD/kW (dólares / kilowatt)
			El parámetro a nivel mundial de costos se encuentra reportado entre 1900-3000 USD/kWh, por lo tanto, se busca una optimización frente a los costos para este tipo de tecnología.

¹⁰ Renewable power generation costs in 2024. Webpage: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf

Objetivo Específico 1	E1. Aumentar el rendimiento del proceso de producción de syngas a través de una tecnología de gasificación de residuos de arroz con alto contenido de cenizas.	Indicador y meta	Rendimiento de producción de Syngas ¹⁰ : 1. Eficiencia de conversión de residuos entre 50 a 70% 3. Bajo contenido de alquitrán (TAR) entre 1,16 – 11,8 Kg TAR / m ³ de syngas
Objetivo Específico 2	E2. Asegurar la calidad y composición del syngas producido a partir de la tecnología de gasificación de biomasa.	Indicador y meta	Calidad del syngas producido ¹¹ : 1. Contenido de hidrógeno (H ₂) en syngas: ≥ 4.2% 2. Contenido de monóxido de carbono (CO) en syngas: ≥15%
Objetivo Específico 3	E3. Medir los costos operativos para el escalamiento a través de un análisis técnico-económico para revisar la viabilidad de producir energía eléctrica con la tecnología.	Indicador y meta	Indicador: Análisis técnico- económico ¹² , 1. Costo de inversión del proyecto (Capex): \$ US/ kW instalado 2. Costo nivelado de energía (LCOE) (\$/MWh) LCOE = ≤ 140 USD/MWh 3. Costo nivelado de hidrógeno (LCOH) (\$USD/kg): ≤ 10 USD/kg ¹³
Objetivo Específico 4	E4. Cuantificar la huella de carbono de la energía obtenida.	Indicador y meta	contabilización de emisiones (kg CO ₂ .eq) / MWh ≤ 100 kg CO ₂ -eq/MWh.
Público objetivo	Empresas, universidades y centros de desarrollo tecnológico que se encuentran en escalamiento del proceso de gasificación de biomasa	Localización	Deseable Entidad que cuenta con piloto a escala semi-industrial.
Partes Interesadas	Parte Interesada 1: Gobierno Nacional y entidades públicas. Alcance: Nacional Posición: Cooperante y regulador. Expectativas: Promover alternativas energéticas que diversifiquen la matriz, impulsen la bioenergía y aporten a metas de transición energética nacional. Contribución: Lineamientos regulatorios, facilitación para permisos energéticos y alineación con políticas de transición. Parte Interesada 2: Autoridades ambientales regionales. Alcance: Local		

¹¹ Hafif Dafiqurrohman, Kania Amelia Safitri, M Ismail Bagus Setyawan, Adi Surjosatyo, Muhammad Aziz. Gasification of rice wastes toward green and sustainable energy production: A review. Journal of Cleaner Production. Volume 366, 2022, 132926, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132926>.

¹² Jamilu Salisu, Ningbo Gao, Cui Quan. Techno-economic Assessment of Co-gasification of Rice Husk and Plastic Waste as an Off-grid Power Source for Small Scale Rice Milling - an Aspen Plus Model. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Volume 158, 2021, 105157, ISSN 0165-2370, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105157>.

¹³ Jingyuan Zhao, Rui Zhou, Andrew F. Burke, Lewis M. Fulton, Breakeven levelized cost of hydrogen for the zero-emission freight transition, eTransportation, Volume 28, 2026, 100584, ISSN 2590-1168, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2026.100584>.

	Posición: Cooperante y regulador. Expectativas: operación bajo control ambiental y reducción de riesgos en aire, agua y residuos. Contribución: Emisión de permisos ambientales, acompañamiento técnico, supervisión. Parte Interesada 3: Academia con líneas de biomasa/energía. Alcance: nacional Posición: Cooperante y beneficiario. Expectativas: Acceso a proyectos reales para investigación aplicada, publicaciones, desarrollo de conocimiento. Contribución: Investigación, análisis de composición del biogás, caracterización de biomasa, talento científico. Parte interesada 4: Centros de I+D+i y laboratorios de bioenergía Alcance: Departamental posición: Cooperante y Beneficiarios Expectativas: Validar tecnologías emergentes y fortalecer capacidades en gasificación. Contribución: Infraestructura técnica, asistencia científica, ensayos complementarios. Parte interesada 5: Sector Productivo (Industria y Empresa) Alcance: Local posición: Beneficiarios y cooperantes Expectativas: Valorización de residuos, potenciales ingresos por disposición útil de biomasa. Contribución: Infraestructura, personal técnico, operación del piloto. Suministro de biomasa, trazabilidad, logística de materia prima. Parte interesada 6: Comunidades Locales Alcance: Local posición: Beneficiarios Expectativas: generación de empleo, beneficios económicos y ambientales; evitar afectaciones ambientales o molestias operativas. Contribución: Licencia local para operar. Retroalimentación social, aceptación del proyecto, colaboración territorial.
PDS - Product Design Specifications	Diseñar y realizar mínimo un ejercicio de innovación abierta que permita probar y adaptar tecnologías para dar solución a retos tecnológicos. REQUERIMIENTOS EMPRESA ANFITRIONA: La empresa Anfitriona será la que proveerá al solucionador la materia prima de biomasa residual con alto contenido en cenizas. 1. La infraestructura disponible para proveer la materia prima debe permitir la adecuada entrega al solucionador, asegurando que el sistema de carga cuente con un volumen disponible suficiente de biomasa residual y almacenamiento dedicada para la validación de la tecnología de acuerdo con el consumo en masa (kg/h) requerido para el pilotaje de la tecnología durante la ejecución del piloto. 2. La empresa anfitriona debe garantizar la descripción técnica para cada biomasa entregada al solucionador. 3. La empresa anfitriona debe disponer de un área de dispensación de biomasa con disponibilidad de servicios industriales (agua limpia y electricidad), así como una ubicación estratégica para la entrada de maquinaria y personal. 4. La empresa anfitriona debe disponer mínimo de un coordinador de actividades dentro de las instalaciones del anfitrión para dirigir y concertar los requerimientos institucionales para responder técnica y operativamente, durante la ejecución del piloto experimental por parte del solucionador. El anfitrión debe exigir el cumplimiento estricto de las normas para el manejo, producción y disposición de materias primas, productos y residuos.

5. La empresa anfitriona debe establecer y socializar los lineamientos técnicos para permitir la entrada de maquinaria y del personal por parte del solucionador para la ejecución del piloto.

REQUERIMIENTOS SOLUCIONADOR:

Para este reto, la infraestructura del solucionador puede llegar a ser el lugar donde se va a realizar el piloto. Si es así, el solucionador debe:

1. La infraestructura disponible para el piloto debe permitir la adecuada experimentación, asegurando que el sistema de pruebas cuente con un volumen disponible suficiente de biomasa residual y almacenamiento dedicada para la validación de la tecnología de acuerdo con el consumo en masa (kg/h) requerido para el pilotaje de la tecnología durante la ejecución del piloto en sus instalaciones.
1. Garantizar la disponibilidad de un análisis próximo y elemental para cada biomasa empleada en el estudio.
2. Disponer de un área de experimentación con disponibilidad de servicios industriales (agua limpia y electricidad) para la ejecución del piloto. Así como una ubicación estratégica para la entrada de maquinaria y personal.
3. Disponer mínimo de un coordinador de actividades dentro de las instalaciones para dirigir y concertar los requerimientos institucionales para responder técnicamente, durante la ejecución del piloto experimental. Debe exigir el cumplimiento estricto de las normas para el manejo, producción y disposición de materias primas, productos y residuos.
4. Establecer y socializar los lineamientos técnicos para permitir la entrada de maquinaria y del personal por parte del solucionador para la ejecución del piloto.
5. La tecnología propuesta para el piloto debe ser de TRL 5 o superior, que determina la “Validación de sistema/subsistema/o componente en un ambiente relevante.”¹⁴
6. La propuesta del innovador debe contemplar el escalamiento de la tecnología hacia una escala semi-industrial donde demuestre relevancia técnico- económica en la producción de syngas a escala industrial.
7. Se espera que el piloto cuente con un sistema de gasificación de al menos 40 kWh o superior como evidencia del escalado de la tecnología¹⁵.
8. El innovador debe garantizar para el piloto una operación continua del gasificador para alcanzar una operación estable en pruebas de al menos de 6 horas continuas¹⁶
9. El innovador debe garantizar la medición de parámetros propios del pilotaje que den cuenta al seguimiento de la operación y la medición de los indicadores de los objetivos propuestos.
10. El piloto debe garantizar medición continua y control sobre la alimentación de la materia prima (kg/h), la temperatura de operación del gasificador (°C), el flujo de aire o vapor (kg/h), el flujo de gas (kg/h), concentración de gases con un analizador de gases (%), masa de biochar producida (kg/h).

¹⁴ Descripción de Technology Readiness Levels (TRL) de Minciencias.

https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo5_7.pdf

¹⁵ Manikandan Parathesi, Beno Wincy Winsly, Christus Jeya Singh Vincent. Char reduction and producer gas quality enrichment of rice husk by co-gasifying tyre waste in downdraft gasifier. Fuel, Volume 390, 2025, 134744, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134744>.

¹⁶ Rupesh Kumar Singh, Nilesh D. Dhaigude, Arti Sahu, Gajanan Sahu, Vishal Chauhan, Sujan Saha, Shiva Kumar Saw, Prakash D. Chavan, Oxy-blown bubbling fluidized bed gasification of high-ash Indian coal: A pilot – Scale demonstration, Energy, Volume 347, 2026, 140437, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140437>.

11. El solucionador deberá realizar un ejercicio de benchmarking para el LCOH reportado con esta tecnología.
12. El piloto debe garantizar el venteo y/o quemado del gas producido en el proceso bajo altos estándares de seguridad.
13. El innovador deberá asegurar que, tras el desarrollo del piloto, la tecnología permita calcular en detalle y con soporte un análisis técnico-económico del proceso de generación de energía eléctrica a nivel industrial y la huella de carbono para la energía producida.
14. Es deseable que, también se incluya un análisis técnico-económico para la producción de hidrógeno renovable a partir de la solución.
15. Es relevante que el innovador cuente con experiencia comprobada en pruebas de gasificación de diferentes tipos de biomasa residual en especial con alto contenido de cenizas.
16. Es deseable que la tecnología contemple la gasificación de otras biomásas con alto contenido de cenizas si el piloto lo permite.
17. Se debe evaluar la eficiencia de la tecnología propuesta en comparación con los procesos tradicionales, demostrando posibles ahorros en costos operativos y de inversión (Opex y Capex).
18. La tecnología debe controlar el efecto de la radiación (en caso de que aplique) para que no se generen afectaciones a los trabajadores ni al medio ambiente.
19. El piloto debe maximizar la eficiencia energética requerida para su funcionamiento. Asimismo, se considerará en los criterios de evaluación que la energía utilizada por la tecnología propuesta sea cubierta a partir de fuentes renovables.
20. El diseño del piloto debe contemplar el potencial de escalabilidad de la tecnología, asegurando que los costos Capex/Opex sean competitivos en comparación con tecnologías de referencia en el mercado.
21. El innovador debe contemplar un plan de acción hacia condiciones controladas similares a escenarios reales, como pruebas en sistemas aislados, en dado caso que exista una restricción operativa.
22. El innovador debe cumplir con los requerimientos de HSE y emergencias del aliado receptor para la ejecución del piloto.
23. El innovador debe establecer un protocolo de HSE en la operación del piloto al momento del comienzo de la operación del piloto.
24. El innovador debe contar con un manual de operación para el sistema de gasificación al momento del comienzo de la operación del piloto. Así como garantizar que todos los equipos empleados en el piloto cuentan con el mantenimiento y calibración correspondiente para garantizar resultados precisos, confiables y con trazabilidad.
25. El innovador debe cumplir la normatividad vigente para la ejecución del piloto: en el manejo, producción, disposición y transporte de materias primas, productos y residuos, trabajo en alturas (si requiere), manejo de gases combustibles y requerimientos ambientales.
26. El innovador debe considerar la gestión de permisos bajo la normatividad vigente para la ejecución del piloto.

27. El innovador debe cumplir con rigurosos estándares técnicos de calidad en la ejecución del piloto, con el fin de garantizar datos reproducibles y replicables.

28. El innovador debe garantizar la participación del personal altamente calificado para la ejecución del piloto.

REQUERIMIENTOS HSE PARA EL SOLUCIONADOR:

1. El personal del equipo de innovación que desarrollará el piloto en las instalaciones del Anfitrión, al ingresar deben contar con los siguientes requisitos previamente validados y actualizados durante la ejecución del piloto:
 - Afiliación y pago de: administradora de Riesgos Laborales (ARL), Entidad promotora de salud (EPS), Administradora de Fondos de Pensiones (AFP).
 - Todas las personas deben contar con dotación industrial.
 - El equipo del innovador debe contar con medio de transporte previamente registrado.
 - El equipo del innovador debe traer su propia comida y podrá usar las instalaciones dispuestas por el Anfitrión para tal fin.
 - El equipo del innovador debe establecer el horario de trabajo o jornada laboral (Acompañado por el Supervisor / coordinador del piloto desde el Anfitrión).
 - El equipo del innovador debe disponer el tiempo necesario el primer día para una inducción en Seguridad y Salud en el trabajo.
2. *Gestión de Energía:* Los equipos deben permanecer encendidos únicamente durante las horas de operación y pruebas. Al finalizar la jornada, el responsable debe apagar el equipo para evitar riesgos de acceso no autorizado en horarios no hábiles.
3. *Custodia:* El laboratorio o planta piloto y sus componentes serán supervisados por un colaborador designado de Anfitrión, quien actuará como facilitador para asegurar que se cumplan estas mejores prácticas.
4. *Responsabilidad:* La entidad externa propietaria del equipo asume la responsabilidad total por cualquier vulnerabilidad originada en su hardware o software que pudiera afectar la red del Anfitrión.
5. *Gestión de olores:* el pilotaje debe evitar la generación de olores ofensivos a la atmosfera y emplear todos los mecanismos necesarios para mitigarlos.
6. El horario laboral para el piloto será establecido por el Anfitrión de lunes a viernes. Si se va a operar en un horario diferente se establecerán las condiciones para tal fin.

REQUERIMIENTOS CIBERSEGURIDAD PARA EL SOLUCIONADOR:

1. *Gestión de Software y Licenciamiento.*
 - Legalidad: Todo el software instalado debe contar con su respectiva licencia corporativa vigente. La entidad propietaria es la única responsable del cumplimiento legal y técnico de estas.
 - Restricción de Instalación: Se prohíbe estrictamente la instalación de ejecutables sin licencia, software "crackeado" o licencias de uso personal/doméstico en entornos empresariales.
 - Propósito del Equipo: El hardware debe destinarse exclusivamente a las tareas técnicas del proyecto. No se permite su uso como estación de trabajo para fines administrativos, personales o ajenos a la colaboración con el Anfitrión.
2. *Seguridad del Sistema y Protección de Datos:*
 - Protección Antivirus: Los equipos deben contar con una solución de antivirus/EDR corporativa, activa y con firmas actualizadas.
 - Actualizaciones del Sistema: El sistema operativo debe tener instalados los últimos parches de seguridad críticos.

	- Transferencia de Información: Para el intercambio de datos, se priorizará el uso de protocolos seguros: APIs con autenticación, servicios en la nube (Google Drive corporativo) o correo electrónico. Se desaconseja el uso de medios extraíbles (USB) para mitigar riesgos de malware. 3. <i>Conectividad y Acceso a la Red:</i> - Acceso a Red: La conexión se realizará a través de la red pública interna del Anfitrión (WiFi o cableada), sujeta a la disponibilidad de cobertura en el área de instalación. Esta red está aislada de los servidores críticos de la organización. - Soporte Remoto: Cualquier acceso remoto para mantenimiento técnico deberá ser supervisado por el responsable del equipo en la empresa anfitrión.
Restricciones	- No se deben usar fuentes radioactivas en intensidad y/o cantidades de manejo que presenten una afectación a la salud o al medio ambiente. - Para la selección de la tecnología se debe considerar un impacto ambiental mínimo ante posibles derrames o liberaciones accidentales en el medio ambiente. - Entre otros identificados en el proceso de experimentación.
Impacto esperado	Se espera la validación de una solución tecnológica probada en un entorno relevante (TLR≥5) para maximizar la producción de syngas a través de una tecnología de gasificación de biomasa con alto contenido de cenizas, en los procesos operativos y/o de investigación y desarrollo de entidades que realicen gasificación de biomasa. Este prototipo deberá maximizar la producción de electricidad al menor costo. El piloto deberá garantizar eficiencia energética en el proceso, proteger la integridad de los activos y proyectar la tecnología hacia la escalabilidad por medio de un análisis técnico-económico de la solución hacia la producción de energía eléctrica. La propuesta tecnológica deberá fortalecer las capacidades actuales de Ecopetrol S.A en la producción de energía eléctrica a partir de biomasa para diversificar/complementar la matriz energética nacional.