TÍTULO: PROPUESTA DE MEJORA PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EMISIONES PARTICULADAS EN LA PLANTA DE BIOMASA DE PUERTO CARREÑO, VICHADA, MEDIANTE EL DISEÑO DE UN CICLO MULTIETAPA CON APOYOS DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y DE SISTEMAS.

Karen Julieth Mendez Bustos

Nataly Xiomara Martinez Silva

Santiago Andrés Castro Ardila

Arnold Steinbeck Fuentes Gonzalez

Brayan Andrés Hernández Rodríguez

Universidad Ean

Facultad Ingeniería

Docente: Julian Felipe Segura Contreras

Bogotá, Colombia

21 de Noviembre de 2025

1. PREGUNTA

¿Cómo diseñar e implementar sistemas eficientes de captación y filtración de partículas de ceniza generadas por la combustión de biomasa en la planta de Puerto Carreño, para minimizar los impactos ambientales y mejorar la calidad del aire, integrando soluciones desde la ingeniería de energías y de sistemas?

2. HIPÓTESIS

La implementación de un sistema multietapa de filtración (con filtros ciclónicos, filtros de mangas y, si es necesario, lavadores de gases) junto con la automatización del monitoreo en la planta de biomasa de Puerto Carreño, reducirá significativamente la concentración de material particulado y cenizas en el aire, mejorando la calidad ambiental y la salud de la comunidad, además de optimizar la eficiencia energética y operativa del proceso.

3. ESTADO DEL ARTE

La planta de biomasa de Puerto Carreño tiene un impacto directo sobre la calidad del aire local, que registra episodios de contaminación significativa, llegando a niveles considerados “deficientes” y poco saludables para grupos sensibles, según reportes de ICA recientes. Aunque en días promedio los datos de PM2.5 y PM10 aparecen en rango aceptable, el riesgo de exposición sigue vigente debido a la presencia de partículas finas —especialmente durante las actividades de molienda y recolección de ceniza, como lo evidencian los testimonios locales. AccuWeather. (2025)

Las entrevistas con trabajadores y pobladores de la región permiten comprender cómo, en la operación cotidiana de la planta, la exposición al polvo y material particulado representa un problema de salud y de condiciones laborales. Los entrevistados destacan que la mayor exposición se produce al triturar madera y recolectar ceniza, donde el polvillo queda suspendido en el ambiente y es fácilmente inhalable. Por esta razón, el uso de tapabocas se ha

vuelto una medida común para protegerse dentro y fuera de la planta. Además, mencionan que los residuos generados por la planta se presentan en tres formas: piedras, granos y polvo fino; siendo este último el más propenso a dispersarse en el aire y afectar la salud humana.

Estos relatos concuerdan con la literatura técnica sobre plantas de biomasa: la ceniza fina y el material particulado generado en cada etapa de procesamiento poseen propiedades físicas que facilitan su transporte aéreo, especialmente en ambientes abiertos como la sabana de Puerto Carreño. TCS Filtración. (2024).

Por otra parte, los pobladores subrayan que la gestión y recolección manual de residuos influye en la dispersión del polvo, así como en la exposición de los empleados, y recomiendan la automatización de tareas de filtración y monitoreo para minimizar riesgos.

En cuanto al entorno sociocultural, aunque en Puerto Carreño existe presencia significativa de comunidades indígenas con autoridad sobre el manejo de ciertos residuos, en este caso el proyecto está enfocado exclusivamente en la mejora tecnológica y ambiental de la planta de biomasa ya existente. Por lo tanto, la relevancia de estas comunidades no afecta directamente el proceso técnico de implementación de los filtros, aunque sigue siendo importante mantener buenas relaciones comunitarias y respetar las normas locales para el manejo adecuado de subproductos y residuos.

Finalmente, experiencias previas en otros contextos, como en plantas de biomasa en Venezuela y Colombia, han mostrado que la implementación de filtros multietapa y sistemas automatizados de monitoreo no solo reduce significativamente la dispersión de partículas, sino que también puede derivar en el aprovechamiento de cenizas para actividades agrícolas, siempre y cuando lo permita la calidad del suelo y la logística local. ENGIE. (2024)

4. DISEÑO / PROTOCOLO

Tipo de estudio: Experimental y tecnológico aplicado, basado en modelos de observación y simulación, entrevistas y análisis visual (por limitación de acceso a la planta, utilizando fotografías y observaciones externas).

Procedimiento:

1. Diagnóstico ambiental y operativo de la planta mediante entrevistas, observación externa y registro fotográfico.
2. Selección y diseño de un ciclo multietapa de filtración:
    a. Filtros ciclónicos para partículas gruesas.
    b. Filtros de mangas (baghouse) para partículas finas.
    c. Lavador de gases (scrubber húmedo) como etapa final si se requiere una máxima eficiencia.
3. Instalación de sensores de PM, temperatura y humedad en puntos estratégicos dentro del área de operación y dispersión.
4. Desarrollo de una plataforma inteligente (IoT) de control y monitoreo, capaz de simular la dispersión de partículas y ajustar el proceso automáticamente.
5. Fase piloto: implementación parcial y validación de la eficiencia del sistema bajo condiciones reales.
6. Recopilación y análisis de datos para ajustes y optimización.

Rol de la Ingeniería en Energías:

Ajustar y optimizar variables de combustión (temperatura, tamaño de partícula, flujo de aire) para incrementar eficiencia energética y reducir la generación de ceniza. Esta intervención

permite mayor aprovechamiento de la biomasa y menor cantidad de residuos (Demirbaş, 2023; Khan et al., 2024).

Rol de la Ingeniería de Sistemas:

Desarrollar monitoreo, plataformas de simulación y algoritmos de control que mejoren la gestión integral de la filtración y permitan adaptar la operación en tiempo real a las variaciones ambientales y operativas.

5. VARIABLES (OPERACIONALIZACIÓN)

- Independientes: tipo/configuración de filtración, parámetros de combustión optimizados, algoritmos de la plataforma inteligente.
- Dependientes: concentración de partículas PM ($\mu g/m^3$), eficiencia en reducción de ceniza (%), consumo de biomasa (kg/h).
- Control: clima local, volumen/tipo de biomasa quemada.
- Medición: sensores para PM y condiciones ambientales, registro de consumo de biomasa, inspección visual y toma de muestras.

6. INSTRUMENTOS / DATOS

- Sensores para PM2.5/PM10, temperatura y humedad.
- Equipos: filtros ciclónicos, mangas y scrubber.
- Plataforma IoT para integración de datos y control automatizado.
- Fotografías y registros visuales de equipos y residuos.

- Datos históricos y en tiempo real sobre operación y consumo.
- Criterios de inclusión: áreas accesibles y circundantes a la planta; criterios de exclusión: datos internos no disponibles por restricción de ingreso.

7. PLAN DE ANÁLISIS

Fase 1. Línea base ambiental y operativa (Semana 1-2)

- Recolectar datos iniciales: Medición de concentración de PM2.5 y PM10 en el aire, temperatura, humedad y consumo de biomasa antes de la intervención.
- Instrumentos: Sensores ambientales, registros operativos, entrevistas y fotografías.
- Objetivo: Definir el estado actual y cuantificar el impacto ambiental y operativo de la planta.

Fase 2. Instalación y puesta en marcha (Semana 3-5)

- Implementar el ciclo filtrante: Montaje de filtros ciclónicos, mangas y (si aplica) scrubber, según disponibilidad logística.
- Verificar funcionamiento: Prueba de equipos y calibración de sistemas de monitoreo.
- Capacitación local: Entrenamiento del personal en operación y mantenimiento.

Fase 3. Monitoreo continuo y modelado (Semana 6-9)

- Medición diaria/continua: Registrar PM, temperatura, humedad y consumo de biomasa.
- Plataforma IoT: Integración de datos para visualizar en tiempo real y almacenar históricos.

- Simulación computacional: Modelar la dispersión de partículas bajo diferentes condiciones ambientales.

Fase 4. Comparación y validación (Semana 10-11)

- Análisis cuantitativo: Calcular reducción porcentual de PM y cenizas, eficiencia energética (kg biomasa/kWh).
- Comparación: Contrastarlo con los datos de la línea base.
- Evaluación de operación: Identificar mejoras y ajustes requeridos en los sistemas instalados.

Fase 5. Informe final y recomendaciones (Semana 12)

- Resultados: Interpretar todos los datos y métricas, mostrar logros, costos, limitaciones y propuestas de mejora.
- Presentación: Informe técnico, gráficas de evolución y dispersión, recomendaciones para la sostenibilidad.

Indicadores y métricas clave

- Reducción absoluta y relativa de concentración de PM ($\mu g/m^3$)
- Eficiencia energética: consumo de biomasa por kWh producido
- Costos operativos y logísticos antes/después
- Número de mantenimientos/reparaciones requeridas
- Percepción comunitaria recogida en entrevistas

Cronograma de ejecución

Fase	Actividades principales	Semanas
Línea base	Diagnóstico, medición, entrevistas	1-2
Instalación y puesta en marcha	Montaje sistemas, capacitación local	3-5
Monitoreo y modelado	Operación, registro, simulaciones	6-9
Comparación y validación	Análisis, ajustes, comparación	10-11
Informe y recomendaciones	Redacción, presentación, cierre	12

Este cronograma es ajustable según la disponibilidad logística y condiciones locales.

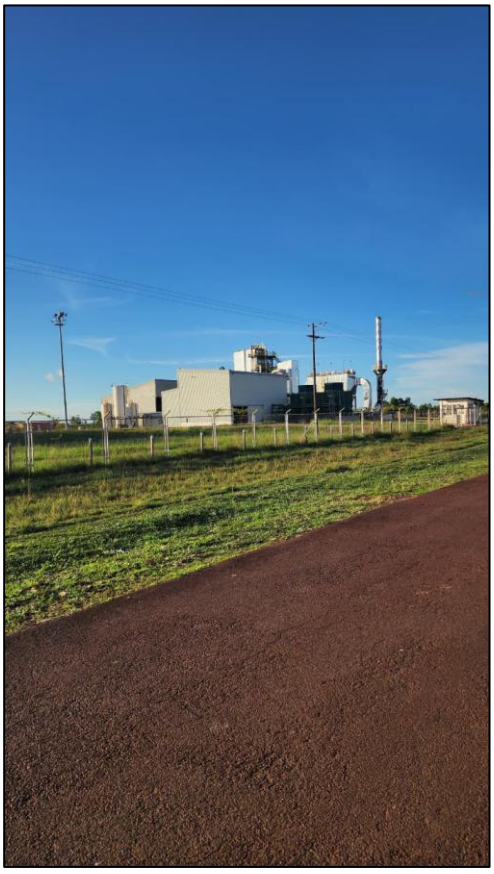
8. RIESGOS

- Fallo de sensores/calibración: mitigación mediante redundancia y mantenimiento periódico.
- Limitaciones de acceso: uso de observaciones indirectas y simulaciones.
- Costos iniciales altos: gestión por fases y priorización de etapas.
- Temas éticos: consentimiento para entrevistas y registro de imágenes; protección de datos personales.

9. IMAGENES







Referencias (APA 7ª edición)

- Demirbaş, A. (2023). *Biomass Combustion and Gasification: Practical Design and Theory. Academic Press.*
- Khan, M. J., Iqbal, M. T., & Qu, P. (2024). *Optimization of combustion process parameters for reduced emissions and improved energy efficiency in biomass power plants.* Renewable Energy Reviews, 58(2), 135-147.

  https://doi.org/10.1016/j.rer.2023.10210
- Gore. (2020). *Mangas filtrantes para el sector de la recuperación de energía.* https://www.gore.com.es/products/mangas-filtrantes-para-el-sector-de-la-recuperacion-de-energia
- Verlek. (2019). *Lavador de gases para cumplimiento normativo.* https://verlek.com/2019/02/02/lavador-de-gases-2/
- IFD filtracion. (2025). *Mangas filtrantes y filtros de mangas: depuración de cenizas y gases industriales.* https://www.ifdfiltracion.es/mangas-filtrantes-y-filtros-de-mangas-depuracion-de-cenizas-y-humos/
- AccuWeather. (2025*). Índice de calidad del aire de Puerto Carreño, Vichada, Colombia.* https://www.accuweather.com/es/co/puerto-carreno/106808/air-quality-index/10680
- ENGIE. (2024). *Las cenizas de biomasa y sus beneficios ambientales y económicos para la industria.* https://www.engie.es/potencial-de-las-cenizas-de-biomasa-beneficios-ambientales-y-economicos-para-la-industria/

- TCS Filtración. (2024). *Filtros para calderas de biomasa.* https://www.aspiracionyfiltracion.com/actualidad/filtros-para-calderas-de-biomasa
- Krohne. (2025). *Gestión de cenizas en las centrales eléctricas de biomasa.* https://www.krohne.com/es-co/industrias/industria-de-generacion-de-energia/produccion-centrales-electricas-biomasa-combustible-mixto-industria-generacion-energia/gestion-cenizas-centrales-electricas-biomasa