ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA COMBUSTIÓN DE RAC GENERADOS EN DOS INGENIOS DEL VALLE DEL CAUCA EN UN SISTEMA A ESCALA PILOTO

MICHEL VALENTINA REALPE CISNEROS

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

CALI, COLOMBIA

2024

ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA COMBUSTIÓN DE RAC GENERADOS EN DOS INGENIOS DEL VALLE DEL CAUCA EN UN SISTEMA A ESCALA PILOTO

MICHEL VALENTINA REALPE CISNEROS

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

DIRECTOR:

JAIME JOSE ACUÑA POLANCO

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

CALI, COLOMBIA

2024

DEDICATORIA

A mi madre, el pilar más fuerte de mi vida, por su amor incondicional, sus sacrificios y por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia todo es posible. Gracias por ser mi ejemplo de valentía y dedicación. Este logro es tanto tuyo como mío.

A mi familia, por su apoyo constante, por creer en mí cuando yo dudaba, y por estar siempre a mi lado en cada paso de este camino. A todos vosotros, les dedico este trabajo con profundo agradecimiento y amor

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, por darme la salud, la paciencia y la fortaleza para culminar esta etapa, además de sus bendiciones y su infinito amor.

A mi madre por ser mi ejemplo, por ser mi apoyo ante cualquier adversidad, el amor que me ha brindado es algo invaluable y ese amor me ha permitido culminar con éxito cada meta que me he propuesto.

A mi querida hermana por apoyarme incondicionalmente y ayudarme a realizar los experimentos de este proyecto, sin ti no hubiera sido posible terminar.

A cada una de las personas de mi familia, que en su momento me dieron una palabra de aliento y me apoyaron para cumplir mis sueños, en especial a mi tía Maribel quien siempre se ha preocupado por mi bienestar.

A mi director Jaime José Acuña Polanco por la confianza brindada y por su valiosa guía y ayuda en la realización y culminación de este proyecto.

RESUMEN

El estudio se centró en el análisis comparativo de la combustión de Residuos Agrícolas de Caña (RAC) provenientes de dos ingenios en Valle del Cauca, utilizando un calderín de parrilla móvil a escala piloto. Se evaluaron diversos parámetros de combustión, incluyendo perfil de temperatura y las emisiones de gases nocivos. Los resultados revelaron que el RAC 1 mostró un mejor perfil de temperatura y menores emisiones, lo que sugiere que su composición y características físicas favorecen un proceso de combustión más limpio y eficiente en comparación con el RAC 2.

Además, se examinó el impacto de la configuración de los dampers en la mezcla de aire y la combustión. Se encontró que una adecuada regulación de los dampers es fundamental para optimizar la distribución del aire, lo que a su vez mejora la eficiencia de la combustión. Este análisis resalta la importancia de la gestión y selección de residuos agrícolas en la producción de energía, sugiriendo que la implementación de prácticas adecuadas en la combustión de biomasa puede ofrecer una alternativa energética más sostenible y menos contaminante que los combustibles fósiles, contribuyendo así a un futuro energético más limpio.

Palabras clave: Perfil de temperatura, residuos agrícolas de la caña (RAC), combustión, distribución de aire, emisiones, calderín de parrilla móvil.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 7
1 MARCO TEÓRICO 9
1.1 MARCO CONCEPTUAL 9
1.1.1 Aprovechamiento de la biomasa 9
1.1.2 Residuos agrícolas de la caña de azúcar 10
1.1.3 Procesos termoquímicos 11
1.1.4 Combustión de RAC 11
1.1.5 Biocombustible 12
1.1.6 Sistema en escala piloto 12
1.1.7 Análisis proximal 14
1.1.8 Análisis elemental 15
1.1.9 Producción energética por medio de RAC 16
1.1.10 Perfil de temperatura 16
1.1.11 Gases de chimenea 17
1.2 ANTECEDENTES 18
2 METODOLOGÍA 20
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RAC 20
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO DE COMBUSTIÓN 21
2.3 ESTABLECIMIENTO CONDICIONES LÍNEA BASE 23
2.4 PRUEBAS DE COMBUSTIÓN 23
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS 25
4 CONCLUSIONES 45
5 RECOMENDACIONES 46
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 47
7 ANEXOS 53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis proximal del RAC 1. 25
Tabla 2.Análisis elemental del RAC 1. 25
Tabla 3.Análisis proximal del RAC 2. 26
Tabla 4.Análisis elemental del RAC 2. 27
Tabla 5.Caudal de aire de alimentación suministrado por el ventilador. 28
Tabla 6.Caudal de aire salida del damper 1. 29
Tabla 7.Caudal de aire salida del damper 2. 29
Tabla 8. Caudal de aire salida del damper 3. 30
Tabla 9.Caudal de aire salida del damper 4. 30
Tabla 10.Caudal de aire salida del damper 5. 31
Tabla 11. Resultados de la Velocidad de Alimentación de Biomasa. 32
Tabla 12. Velocidad de la parrilla móvil. 32
Tabla 13. Análisis cenizas del RAC 1. 41
Tabla 14. Análisis cenizas del RAC 2. 42
Tabla 15. Área externa de los dampers. 53
Tabla 16. Velocidad de salida del dámper 1. 53
Tabla 17.Velocidad de salida del dámper 2. 53
Tabla 18. Velocidad de salida del dámper 3. 54
Tabla 19. Velocidad de salida del dámper 4. 54
Tabla 20. Velocidad de salida del dámper 5. 54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rutas de aprovechamiento de la biomasa(Cenicaña)..... 10
Figura 2. Diagrama PID del sistema a escala piloto..... 13
Figura 3.Pellets de residuos agrícolas de la caña. 20
Figura 4.Sistema de control del caudal de alimentación de aire. 21
Figura 5.Sistema de control de los dampers. 22
Figura 6.Cámara de combustión. 24
Figura 7. Dimensiones del tornillo de alimentación. 33
Figura 8. Perfil de temperatura del RAC 1. 39
Figura 9. Perfil de temperatura del RAC 2. 40

INTRODUCCIÓN

La industria de la caña de azúcar es uno de los grandes dinamizadores de la economía en el departamento del Valle del Cauca. Las condiciones climáticas de la región posibilitan que la caña de azúcar se constituya en materia prima para la producción de azúcar, múltiples derivados, alimento para animales, entre otros. Sin embargo, en el proceso industrial implementado para ello se generan cantidades significativas de residuos que tienden a acumularse desde el momento de la cosecha de la caña hasta la obtención del producto final. Dentro de dichos desechos, sobresalen los denominados Residuos Agrícolas de la Caña de Azúcar (en adelante RAC), los cuales están compuestos en su gran mayoría por hojas verdes y secas, cogollos, tallos y cañas no recuperables. Esto se constituye en una biomasa caracterizada esencialmente por el potencial calorífico que puede alcanzar gracias a que está integrada por lignina que tiene un alto contenido de carbono.

A pesar de que el RAC presenta un potencial como fuente de energía renovable, cerca de 20 millones de toneladas de este residuo son quemadas cada año en el departamento del Valle del Cauca, lo que genera contaminación significativa del medio ambiente por acción de la diseminación de cenizas, humos y gases tóxicos. Esto se traduce no solo en un gran problema de salud pública particularmente para las personas directa e indirectamente expuestas a estas emisiones, sino en un desperdicio considerable de un recurso natural valioso que puede ser aprovechado estratégicamente, por ejemplo, en la producción energética mucho más cuando la región y el país enfrentan en la actualidad una crisis y diversos retos sobre el particular (Peñaranda, Montenegro y Giraldo, 2017).

Una de las alternativas frente a la situación presentada es lo que se viene realizando en la Universidad del Valle, en donde se cuenta con un sistema de combustión a escala piloto. Se trata de un calderín de parrilla móvil acuotubular, en el que la biomasa se incinera en el quemador de la caldera, liberando calor y generando gases calientes los cuales circulan por el exterior de los tubos del sistema que están llenos de agua. A medida que los gases calientes pasan por el exterior de los tubos, transfieren su calor al agua, elevando su temperatura y generando vapor. Este proceso permite la evaluación de diferentes parámetros de la combustión de los RAC en condiciones que faciliten el escalado de correlación con sistemas

existentes en ingenios azucareros del Valle del Cauca (Forero, C 2022). A partir de ello, pueden determinarse las condiciones óptimas del proceso de producción de energía que posibilite el aprovechamiento de los RAC en beneficio de la comunidad, medio ambiente, ingenios e industria azucarera en general. Ver figura 2 y 3.

En esta dirección, el presente trabajo tiene como propósito general analizar comparativamente el proceso de combustión de los RAC generados en dos ingenios azucareros localizados en el departamento del Valle del Cauca en un sistema a escala piloto. Para ello, en primer término, se establecen las condiciones operacionales de la línea base del equipo en este caso del calderín de parilla móvil para el proceso de combustión de los RAC generados en los ingenios analizados; posteriormente, se evalúa el comportamiento del perfil de temperatura y de manera estequiométrica se analizan los gases de chimenea que se producirán en la combustión de los RAC de los ingenios azucareros estudiados.

1 MARCO TEÓRICO

1.1MARCO CONCEPTUAL

1.1.1 Aprovechamiento de la biomasa

La biomasa hace referencia al material orgánico no fosilizado, caracterizada por su multifuncionalidad y constitución de diversos componentes como los alimentos, la industria textil, farmacéutica, papelera, de construcción, etc., mantiene su atención e importancia en el desarrollo básico de los planteamientos antropológicos. Por otro lado, posee la capacidad en el fundamento de producción energética dado que, por medio de diferentes fases, puede transformar sus propiedades para aportar como sustancia combustible o más conocido como biocombustible. (Velázquez B, 2018).

La producción energética por biomasa agrícola, supone un aprovechamiento de cultivos basado en 3 aspectos a considerar; en primer lugar, se fomenta la oportunidad de uso sostenible para dejar de lado el seguimiento de las consecuencias ante la manipulación del petróleo y el carbón; en segunda instancia, se da la disminución de liberación de gases como CO2, sujetos principales en el desarrollo del efecto invernadero y cambio climático por acción del calentamiento global; finalmente, se identifica la influencia del entorno rural y el factor de la agricultura como fuente de ingreso y producción para la satisfacción de requisitos básicos de existencia , no obstante para algunos países se expone el bajo perfil de inversión ante su desarrollo y crecimiento, rechazando la competitividad y el progreso de su práctica. (Velázquez B, 2018).

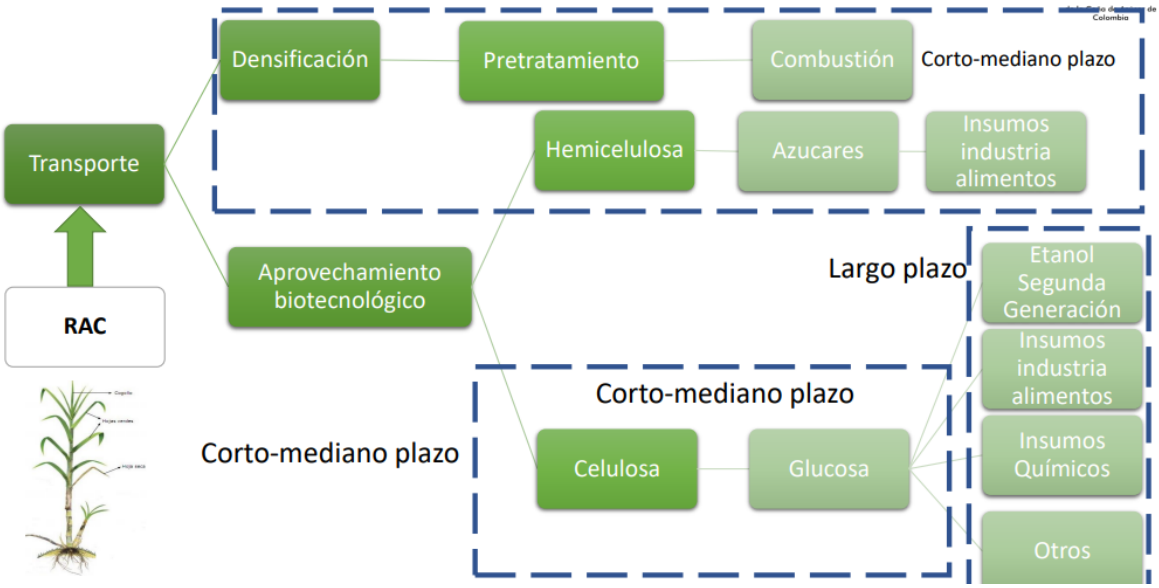

Figura 1. Rutas de aprovechamiento de la biomasa(Cenicaña).

1.1.2 Residuos agrícolas de la caña de azúcar

Sé componen de cogollos, cañas que no tienen un propósito natural fijo (no recuperables) y hojas verdes y secas; su disponibilidad aproximada representa un valor de 50 millones de toneladas, además, su caracterización y función en términos ambientales reflejan un alto grado de interés como recurso extenso, abundante, renovable, aportador en diversos sectores y no dañino en el entorno. Los RAC, mantienen un énfasis especial como generación de alimento para ganado, intensificando de manera directa la producción de combustible, fertilizantes y gasificaciones. (Triana O, León T, Cespedes M. & Cámara A, 2014).

Antes del proceso de combustión, se hace un previo acondicionamiento en el que se detalla y resalta la estimación de la biomasa de los residuos, identificado la humedad, la uniformidad y la dimensión de las partículas, con el fin de esquematizar el sistema de control respectivo para la producción de energía, además, se remite que el potencial de cosecha acumulado abastece la diversidad de experiencias y demandas en el estudio y las necesidades. (Triana O, León T, Cespedes M. & Cámara A, 2014).

1.1.3 Procesos termoquímicos

Los procesos termo químicos en este contexto hacen énfasis a la aplicación de la biomasa generada por agentes limpios, su caracterización se encuentra por el uso de reacciones químicas irreversibles con elevadas cantidades de temperatura en propiedades dirigidas por la oxidación. Su clasificación se indica a partir de la existencia o carencia de oxígeno y la variedad de productos adheridos en su condición, de igual modo, se enuncian 3 grupos de preferencia como la pirólisis, la combustión y la gasificación. (Coronel, E. K.2020)

1.1.4 Combustión de RAC

La combustión se refiere al proceso termoquímico en donde un combustible y un agente oxidante que puede ser aire u oxígeno genera una reacción de carácter exotérmico produciendo calor y los denominados gases de combustión. Las sustancias o materiales más empleados en el proceso de combustión son los combustibles fósiles, los residuos y la biomasa o aquellos residuos orgánicos. Es de remarcar que un combustible adecuado presenta algunas características concernientes a su fácil disponibilidad, economía, amigabilidad ambiental y significativo valor calorífico. La combinación de este último y las condiciones de operación como presión, oxidante en exceso, entre otras establece la calidad de la combustión obtenida, por consiguiente, el calor de salida generado (FAO, 2014).

La combustión de la biomasa es un conjunto de reacciones químicas mediante las que los compuestos orgánicos sufren un proceso de oxidación hasta dióxido de carbono y agua. Esto se desarrolla en altas temperaturas comprendidas entre los 800°C y 1000°C, usando aire como agente oxidante y vincula una fase inicial de pirólisis (degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno) y otra de gasificación anteriores a la combustión propiamente dicha. La insuficiencia de oxígeno posibilita la combustión incompleta y la generación de diferentes productos (vapor de agua, sales minerales, cenizas, óxidos de nitrógeno y de azufre, entre otros). La combustión es utilizada para la generación de energía térmica y eléctrica en distintos procesos industriales como es el caso de la producción de vapor en calderas, la obtención de energía en termoeléctricas y el tratamiento térmico directo de diversas sustancias por medio de superficies. (Gómez, Sánchez y Matallana,2021)

1.1.5 Biocombustible

Los biocombustibles de primera generación hacen referencia a la materia prima originaria de los artículos agrícolas tales como remolacha, caña de azúcar, coco, semilla de algodón, etc., entre sus ventajas más destacables se estima la facilidad y poco riesgo de procesamiento, la mitigación a las emisiones de GEI que aumentan el cambio climático, el incremento de calidad en la combustión y la mejora en la participación experimental como fuente de ingreso rural. Por otro lado, las desventajas presentadas describen un aumento en el precio del mercado alimenticio, un carácter desestabilizador en el uso y funcionamiento del suelo, posible desaprovechamiento del recurso por demanda en la deforestación e influencias sobre la biodiversidad de los territorios. (Contreras S. & Lozano A, 2011).

Los biocombustibles de segunda generación describen su aparición por los residuos generados en la cosecha de numerosos productos, tales como el maíz, la caña, plantas herbáceas y diferentes actividades forestales con un elevado índice de celulosa capaz de transformarse en azúcares. Entre las ventajas propuestas se indica la amplitud y extensa variedad de materia prima, el poco impacto sobre el ambiente, el óptimo rendimiento de energía, el bajo ingreso de producción y recursos y su obtención en diferentes entornos no agrícolas; en otra parte, las desventajas identificadas definen la conversión y la desestabilización en el campo agrícola, el uso de tecnologías en desarrollo y la alta competencia de industrias fabricantes de fibra vegetal. (Contreras S. & Lozano A, 2011).

1.1.6 Sistema en escala piloto

El sistema a escala piloto utilizado en el proyecto fue un calderín de parrilla móvil construido recientemente en la Universidad del Valle con base en el proyecto de la profesora Carmen Rosa Forero Amórtegui denominado “Evaluación de procesos de densificación de residuo agrícola de corte (RAC) de caña de azúcar aptos para su utilización como fuente de energía renovable)” que hace parte de la “Alianza para la sostenibilidad energética de los sectores industrial y de transporte colombiano mediante el aprovechamiento de recursos renovables regionales; Sostenibilidad Energética para Colombia – SENECA”.

En primera instancia el equipo cuenta con una tolva acoplada a un tornillo sin fin con un motor de 0,25 KW de potencia, encargado de alimentar la biomasa y otra tolva de igual forma, pero encargado de alimentar carbón. Luego la biomasa administrada llega a la parrilla móvil, la cual se encuentra dentro de la cámara de combustión en donde al incinerar la biomasa se libera calor y genera gases calientes los cuales circulan por el exterior de los tubos del sistema que están llenos de agua. A medida que los gases calientes pasan por el exterior de los tubos, transfieren su calor al agua, elevando su temperatura y generando vapor. Cabe destacar que la cámara de combustión cuenta con un total de 26 puntos para la medición de temperatura.
Para el control de emisiones se cuenta con un ciclón para la remoción de cenizas volantes, para que posteriormente los gases generados sean expulsados por la chimenea. El sistema de inyección de aire está equipado por 5 dámpers que controlan la distribución del aire primario y cuenta con un sexto damper el cual controla el paso del aire primario al secundario, lastimosamente no se cuenta con un damper entre el aire secundario y terciario.(Forero C,2022)

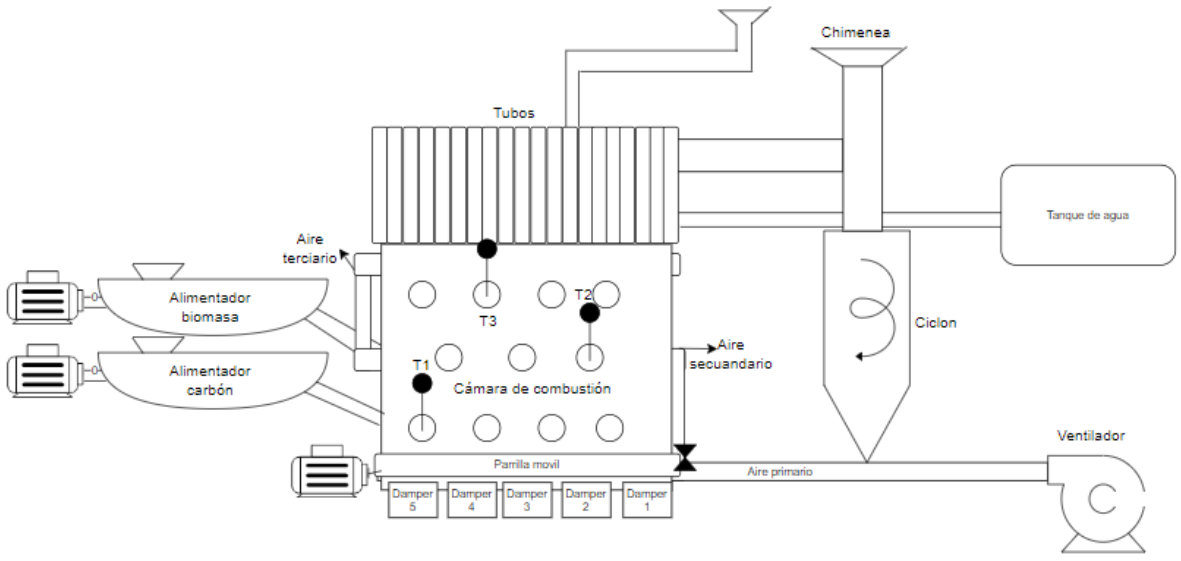

Figura 2. Diagrama PID del sistema a escala piloto.



Figura 3. Sistema a escala piloto real.

1.1.7 Análisis proximal

El análisis proximal es una metodología estándar utilizada para determinar la composición de un combustible en términos de humedad, materia volátil, carbono fijo, cenizas y, en algunos casos, azufre. Este análisis ofrece una visión general del comportamiento del combustible durante la combustión. Por ejemplo:

- **Humedad**: Representa el contenido de agua en el combustible. Un alto contenido de humedad puede reducir la eficiencia de combustión ya que parte del calor generado se utiliza para evaporar el agua, en lugar de ser transferido al proceso.
- **Materia volátil**: Comprende los compuestos orgánicos que se liberan como gases cuando el combustible se calienta en ausencia de oxígeno. Un alto contenido de materia volátil suele indicar que el combustible se encenderá fácilmente y arderá rápidamente.

- **Carbono fijo**: Es el residuo sólido que permanece después de que se han liberado las materias volátiles. Representa el material carbonoso que arderá lentamente en la combustión.
- **Cenizas**: Son los residuos incombustibles que quedan después de la combustión. Un alto contenido de cenizas puede indicar problemas como la formación de escorias en las calderas, lo que reduce la eficiencia operativa.

El análisis proximal es esencial para predecir el comportamiento de la biomasa durante la combustión y para ajustar los parámetros operativos del proceso. Este análisis es ampliamente utilizado en la industria energética y en investigaciones sobre combustibles renovables (Felfli, Rocha, Filipini, & Alves.2005).

1.1.8 Análisis elemental

El análisis elemental proporciona una determinación más detallada de la composición química del combustible, evaluando los porcentajes de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S). Estos elementos son críticos para entender el poder calorífico del combustible y su impacto ambiental:

- **Carbono (C)**: Es el principal componente energético del combustible. Un alto contenido de carbono generalmente indica un alto poder calorífico.
- **Hidrógeno (H)**: Contribuye al poder calorífico, pero en menor medida que el carbono. La presencia de hidrógeno también afecta la formación de agua durante la combustión.
- **Oxígeno (O)**: No contribuye directamente al poder calorífico. Un alto contenido de oxígeno en la biomasa suele reducir su valor energético, ya que el oxígeno está químicamente combinado con otros elementos.
- **Nitrógeno (N)**: Aunque no contribuye significativamente al poder calorífico, su presencia es importante desde el punto de vista ambiental, ya que durante la

combustión se pueden formar óxidos de nitrógeno (NOx), gases que contribuyen a la contaminación atmosférica.

- **Azufre (S)**: Aunque su presencia en la biomasa es generalmente baja, es importante monitorearla debido a que durante la combustión puede formar dióxido de azufre (SO_2), un gas contaminante responsable de la lluvia ácida.

El análisis elemental es vital para calcular la cantidad de aire necesario para la combustión completa y para predecir la formación de gases contaminantes. Además, permite estimar el poder calorífico del combustible, que es una medida clave de su capacidad energética (Demirbaş. 2004); (García.2014).

1.1.9 Producción energética por medio de RAC

Finalizado el procedimiento químico de la combustión, se centra un énfasis en el desarrollo de la transferencia de calor por acción de la evaporación de agua, la presión alcanzada destina el movimiento en un procesador eléctrico, induciendo una corriente capaz de distribuir de manera interna y por transición en red nacional la electricidad, imponiendo un proceso de energía más limpia en diferencia a la quema de combustibles. (Muñoz,M. 2017).

El análisis comparativo de los atributos de los RAC permite mencionar el potencial energético por su apropiación calorífica, no obstante, al usar el producto se visualizan errores e interrupciones por la humedad, llegando a apagar o disminuir el calor en el proceso de combustión. En última instancia, se confirma por medio de estudios la rentabilidad y eficiencia en la fuerza como biocombustibles al acondicionar la debida conversión y transformación de los RAC. (Muñoz M, 2017).

1.1.10 Perfil de temperatura

El perfil de temperatura hace énfasis al registro gráfico de las temperaturas alcanzadas por un producto a lo largo de las diferentes etapas de un proceso industrial, pues, consiste en la medición sistemática de temperaturas mediante el uso de sensores y su representación visual

en función del tiempo y la posición, lo que permite monitorear e interpretar la evolución térmica del producto. El propósito que se tiene del perfilado de temperaturas se centra en controlar que el producto alcance y se mantenga a las temperaturas deseadas durante los tiempos requeridos, según las especificaciones y los parámetros del proceso, de igual modo, los datos de temperatura registrados son analizados por medio de un software especializado que es traducido en graficas nombradas como perfiles térmicos, indicando los valores de temperatura observados, los tiempos y puntos críticos de transferencia de calor y las tasas de cambio. (Coronel, E. K.2020)

1.1.11 Gases de chimenea

Los gases de chimenea hacen referencia a los gases residuales que se generan como subproducto de la combustión de materias combustibles, ya sean sólidas, líquidas o gaseosas, de modo que, son expulsados a la atmósfera a través de tuberías o chimeneas. Asimismo, en procesos controlados de combustión, como los que ocurren en calderas, hornos o motores de combustión interna, se utilizan chimeneas para descargar los gases resultantes y evitar su acumulación, pues, estos gases están compuestos principalmente por dióxido de carbono y vapor de agua, no obstante, también pueden contener óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, partículas en suspensión, hidrocarburos sin quemar y otros compuestos dependiendo del proceso específico y el combustible utilizado. Cabe resaltar que es importante controlar y tratar los gases residuales antes de liberarlos a la atmósfera, con el fin de reducir la contaminación ambiental y evitar un aumento en el calentamiento de la temperatura. (Gómez, Sánchez y Matallana,2021)

1.2 ANTECEDENTES

Entre las investigaciones previas al proyecto presente se estimó la evaluación de análisis en la utilización de los RAC a partir de su combustión para el origen de energía en una empresa agroindustrial en la provincia de Chiclayo, Perú. Durante el proceso de avance proyectil se posibilitó definir que la energía del calor proveniente de los RAC se describió suficiente dentro de la optimización de resultados, pues se calculó un valor de 3,352,513,680 kJ. El resultado estudiado proyectó la eficiencia ante la viabilidad de la investigación, dado que, la metodología acogida superó las expectativas de producción, satisfacción, subordinación, promoción y obtención de energías limpias con poco flujo de impacto sobre el entorno ambiental. (Coronel E, 2020).

Autores ecuatorianos, llevaron a cabo otro de los aspectos de análisis en uno de sus ingenios para determinar la funcionalidad de los sistemas de cogeneración a través de la biomasa de la caña de azúcar. El procedimiento empleado determinó el combustible generado para la manutención de los sistemas de calderas en la adquisición de energía renovable, pues entre los datos y noticias del desarrollo se infirieron 3 tipos de energía como sistema de cogeneración, entre ellas la de temperatura (térmica), la de electricidad (eléctrica) y la del movimiento (mecánica). (Verdezoto L, Parco F, Jacomé C, Katan W. & Mora A, 2021).

En Tegucigalpa, Honduras se estableció la factibilidad en el uso de los residuos agrícolas de la caña de azúcar, teniendo en cuenta su objetivo sobre cogeneración energética en una compañía de azúcar. La capacidad de producción fue evaluada al trabajar RAC con 6200 de cantidad de BTU por libra, y un porcentaje de humedad del 10,84%, dejando datos de al menos 525 kW por tonelada de producto; el comportamiento económico con base en su financiación e inversión remitió buenas expectativas concluyendo el alto potencial energético por combustión de RAC. (Cruz H. & Guillen I, 2019).

En Colombia, se realizó un análisis investigativo donde enunciaron el comportamiento de la biomasa residual agrícola como factor en producción de un potencial energético. Los resultados obtenidos dataron el cumplimiento normativo de la ley 1715 de 2014 debido a las fuentes de generación propia sin daño externo ambiental, asimismo, se le dio beneficio y

apoyo al sector agroindustrial para el avance y evolución de energía renovable en empresas azucareras. (Galán X, 2016).

Por otro lado, en Colombia se generó un software especializado en un algoritmo capaz de regular y describir el valor potencial de la energía en medio de un proceso de combustión a partir de cultivos y cosechas típicas. Cómo aspectos de relevancia se afirmó la variedad de territorios por su diversidad ambiental, catalogando y visionando al país como uno de los mayores precursores del biocombustible en un futuro, de igual modo, se enfatizó el cálculo y el requerimiento tecnológico para enriquecer y mejorar el estándar de energía al aprovechar recursos únicos y tradicionales del país. (Correa S, 2016).

La biomasa derivada de residuos agrícolas representa una interesante oportunidad para la generación de energías renovables, específicamente, el residuo agrícola de cosecha (RAC) originario del cultivo de caña de azúcar que ha demostrado tener un alto potencial energético, no obstante, se requiere de procesos adecuados de densificación de la biomasa para mejorar sus propiedades físicas y químicas, optimizando así su uso posterior como combustible sólido. Dentro de los objetivos de investigación se torna fundamental evaluar diferentes procesos de densificación de RAC de caña mediante el desarrollo de un modelo financiero que facilite la comparación de costos y beneficios proyectados de las distintas opciones a lo largo del tiempo, lo que permitirá seleccionar la mejor ruta de aprovechamiento energético. (Vásquez A. & Vidal J, 2022).

Diversos estudios estipulan que los procesos de combustión de biomasa para la generación energética requieren del diseño y operación de tecnologías apropiadas que permitan el carácter eficiente y limpio de estos recursos renovables, de este modo, diferentes configuraciones de combustores de biomasa se han desarrollado con el propósito indicado 3 tipos diferentes, los de lecho fijo, lecho fluidizado y lecho arrastrado. Estas tecnologías se componen típicamente de sistemas de alimentación de combustible, extracción de cenizas, control de emisiones y temperatura, etc., entre los aspectos a resaltar se menciona la determinación de rangos óptimos en operación y la contribución a la mejora tecnológica para las condiciones laborales.

2 METODOLOGÍA

Con el fin de analizar comparativamente el proceso de combustión de los RAC generados en dos ingenios azucareros localizados en el Valle del Cauca en un sistema a escala piloto, se realizaron las siguientes actividades:

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RAC

Se recolectaron muestras representativas de dos tipos de residuos agrícolas de caña, denominados RAC 1 y RAC 2. Las muestras fueron transportadas al laboratorio de combustión de combustibles (LCC) de la Universidad del Valle donde se realizó su caracterización mediante análisis proximal y elemental, con el fin de conocer sus propiedades básicas y los datos sobre su composición química, los cuales son parámetros esenciales para entender el comportamiento del material durante la combustión y cruciales para calcular el aire teórico necesario para la combustión completa.

Cabe resaltar que la biomasa se encontraba en forma de pellets de tamaño aproximadamente una pulgada, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4.Pellets de residuos agrícolas de la caña.

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO DE COMBUSTIÓN

Como primer paso se procedió a caracterizar el sistema de inyección de aire, con el propósito de conocer su configuración y si presentaba errores en la misma. Se estudió el ventilador, el cual cuenta con un medidor de caudal de aire en la parte superior y con un sistema de control permitiendo variar el caudal de 0% a 100% abierto, como se muestra en la Figura 5:

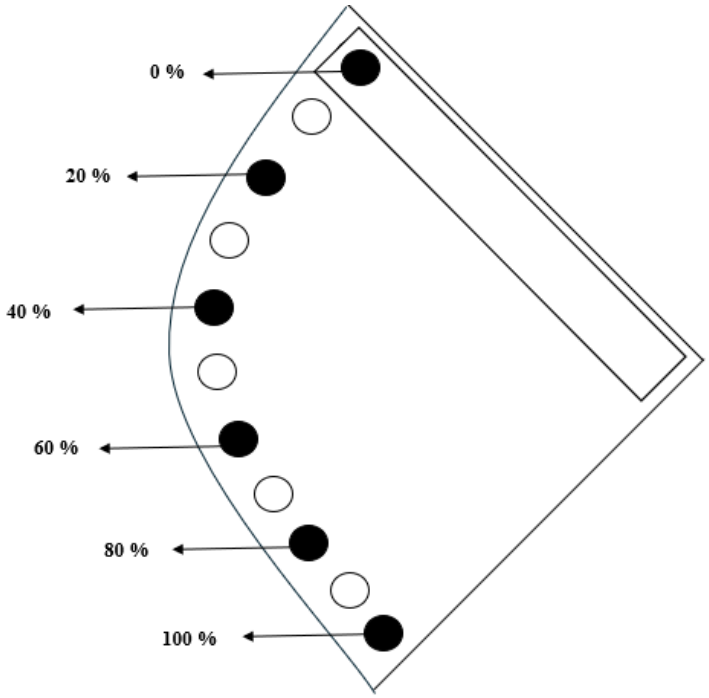

Figura 5.Sistema de control del caudal de alimentación de aire.

Adicionalmente, con ayuda de un anemómetro se midió la velocidad de salida del aire en cada uno de los cinco dampers del sistema. Los dampers están integrados a un sistema de control que permite ajustarlos en cuatro posiciones, como se muestra en la Figura 6:

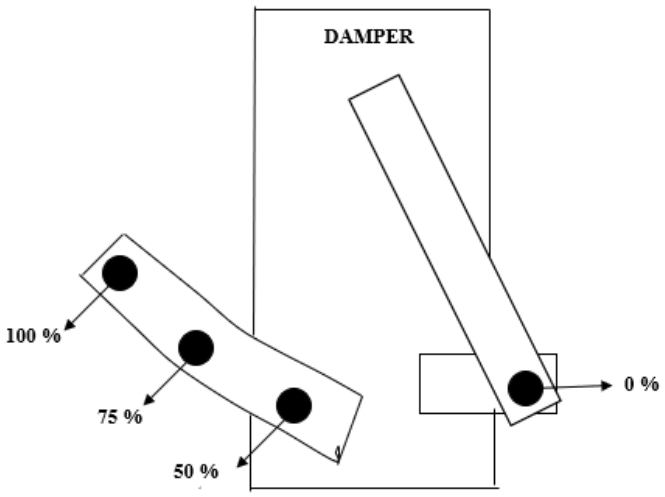

Figura 6. Sistema de control de los dampers.

Utilizando la Ecuación 1 y variando el caudal de alimentación entre 20%, 40%, 60% 80% y 100%, se obtuvo el caudal de salida de aire de cada damper:

$$Q = A * V \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Donde:
Q es el caudal, A es el área de salida y V es la velocidad del aire.

Con estos resultados se conoció la distribución del aire y se configuró de la mejor manera para obtener el aire necesario para la combustión. Cabe resaltar que estos resultados son del aire primario, el secundario y terciario no se usaron debido a que no había un control sobre cerrar el uno del otro.

Para evaluar la velocidad de alimentación de la biomasa, se utilizaron aproximadamente 4250 g de residuos agrícolas de caña en forma de pellets. Las pruebas se realizaron en condiciones de operación en frío en diferentes frecuencias del motor del tornillo de alimentación. Con ayuda de un cronometro se registró el tiempo que tardaba en empezar a caer y el tiempo total de caída de toda la biomasa y con ayuda de la ecuación 2 se conoció la velocidad de alimentación.

$$\text{Velocidad de alimentación } \left({}^{g}/_{s}\right) = \frac{\text{Peso de biomasa (g)}}{\text{Duración de la caida (s)}} \qquad \textbf{Ec. 2}$$

Para la velocidad de la parrilla se midió el tiempo que tardaba en recorrer 1 metro de distancia en las diferentes frecuencias del motor. Para ello, se colocó un objeto en un punto fijo de la parrilla y se cronometró el tiempo necesario para que dicho punto llegara al punto donde completaría una distancia de 1 m. Esto se realizó con el fin de conocer a qué velocidad debía ir la parrilla para que la capa de biomasa no fuera muy gruesa y no se acumulara en un solo punto.

2.3 ESTABLECIMIENTO CONDICIONES LÍNEA BASE

Con los datos recolectados de la caracterización de los RAC, inyección de aire, las pruebas de alimentación y la medición de la velocidad de la parrilla, se establecieron las condiciones óptimas para las pruebas de combustión de los RAC para asegurar una distribución uniforme de biomasa y lograr una eficiente combustión.

2.4 PRUEBAS DE COMBUSTIÓN

Finalmente, se llevaron a cabo las pruebas de combustión para cada uno de los RAC bajo las condiciones establecidas. Para realizar la combustión inicialmente se precalentó la cámara de combustión con ayuda de viruta de madera hasta llegar a 300 °C que es el punto de ignición de los residuos agrícolas de la caña, posteriormente se alimentó 24885 g del RAC 1 a una velocidad de 7,02 g/s, con una inyección de aire de 0,0647 m^3/s y una velocidad de la parrilla de 1 m/h.

Con ayuda de termocuplas colocadas en los siguientes puntos estratégicos se registraron los datos de temperatura a lo largo de la combustión para obtener el perfil de temperatura, los puntos se muestran en la Figura 7:

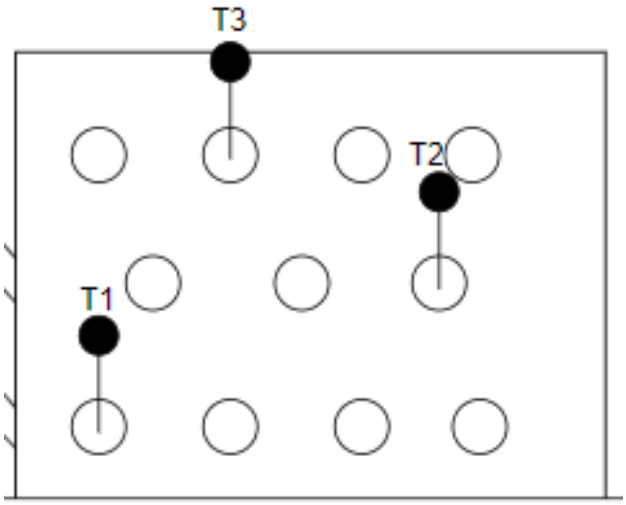

Figura 7.Cámara de combustión.

De igual forma para la combustión del RAC 2, se precalentó la cámara con viruta de madera hasta los 300 °C y posteriormente se alimentó 24885 g, a una velocidad de 7,02 g/s, con una inyección de aire de 0,0657 m^3/s y una velocidad de la parrilla de 1m/h. Se tomaron los datos de temperatura en los mismos puntos estratégicos mostrados en la figura 7. Al finalizar los procesos se tomaron 2 Kg de cada muestra de ceniza obtenida y se llevaron al laboratorio de combustión de combustibles para su respetivo análisis con el fin de obtener los inquemados.

Para los gases de chimenea debido a que no se logró conseguir el equipo que es el medidor de gases se calcularon estequiométricamente con el fin de conocer un valor cercano al real y evaluar las emisiones generadas durante el proceso.

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la tabla 1 y 2 se consignaron los datos dados por el laboratorio LCC sobre la caracterización del RAC 1, esto incluye el análisis proximal y elemental.

Tabla 1. Análisis proximal del RAC 1.

ANÁLISIS PROXIMAL		
Parámetro	**Base húmeda**	**Base seca**
Humedad total (%en peso)	10,80	-
Materia Volátil (%en peso)	64,45	72,24
Cenizas (%en peso)	11,27	12,64
Carbono fijo (%en peso)	13,49	15,12
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)	6382	7154
Azufre	0,22	0,25

Tabla 2. Análisis elemental del RAC 1.

ANÁLISIS ELEMENTAL		
Parámetro	**Base húmeda**	**Base seca**
Cenizas (%en peso)	11,27	12,64
Carbono (%en peso)	36,61	41,05
Hidrogeno (%en peso)	4,68	5,25
Nitrógeno (%en peso)	0,29	0,32
Azufre (%en peso)	0,22	0,25
Oxigeno (%en peso)	36,35	40,50
Poder calorífico inferior (BTU/lb)	5824	6529

El análisis proximal y elemental del RAC 1 muestra características clave para evaluar su viabilidad como combustible en procesos de combustión. En el análisis proximal, destaca un contenido de humedad total del 10,80%, lo que indica que el material es relativamente seco, favoreciendo una combustión más eficiente. Además, el alto contenido de materia volátil (64,45% en base húmeda) sugiere que el RAC tiene una capacidad significativa para liberar

gases combustibles al calentarse, lo cual es esencial para una combustión rápida y efectiva. El contenido de cenizas, que es del 11,27% en base húmeda, es moderado, lo que significa que habrá una cantidad considerable de residuos inorgánicos tras la combustión.

En términos del análisis elemental, el RAC 1 presenta un contenido de carbono del 36,61% en base húmeda, lo que implica un buen potencial energético. Sin embargo, la presencia de oxígeno (36,35%) es alta, lo cual puede reducir la eficiencia energética del material al generar compuestos menos energéticos durante la combustión. Estos resultados son consistentes con estudios previos, como el que realizaron Jenkins, Baxter, Miles Jr y Miles T en 1998 en el que encontraron que la biomasa agrícola, en general, tiende a tener un alto contenido de volátiles y una moderada cantidad de cenizas, características que la hacen adecuada para la combustión en instalaciones diseñadas para manejar tales residuos.

En la tabla 3 y 4 se puede observar el análisis proximal y elemental del RAC 2 entregado por el laboratorio.

Tabla 3. Análisis proximal del RAC 2.

ANÁLISIS PROXIMAL		
Parámetro	**Base húmeda**	**Base seca**
Humedad total (%en peso)	13,54	-
Materia Volátil (%en peso)	66,78	77,24
Cenizas (%en peso)	10,37	11,99
Carbono fijo (%en peso)	9,32	11,78
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)	6011	6910
Azufre	0,19	0,22

Tabla 4. Análisis elemental del RAC 2.

ANÁLISIS ELEMENTAL		
Parámetro	**Base húmeda**	**Base seca**
Cenizas (%en peso)	10,37	11,99
Carbono (%en peso)	35,77	41,37
Hidrogeno (%en peso)	4,8	5,55
Nitrógeno (%en peso)	0,24	0,28
Azufre (%en peso)	0,18	0,20
Oxigeno (%en peso)	38,64	44,61
Poder calorífico inferior (BTU/lb)	5841	6610

En el análisis proximal, se evidencia una humedad total del 13,54% en base húmeda, lo cual es mayor que en el RAC 1, este aumento en la humedad podría disminuir la eficiencia en la combustión. El contenido de materia volátil es de 66,78%, lo cual es relativamente alto y sugiere que una gran parte de la biomasa se volatilizará fácilmente durante la combustión, contribuyendo a una ignición más rápida. Sin embargo, la cantidad de cenizas, que es del 10,37%, es significativa, lo que podría generar más residuos inorgánicos y afectar el mantenimiento del equipo de combustión.

En el análisis elemental, se observa que el carbono constituye un 35,77% en base húmeda, lo cual es moderado y puede proporcionar una cantidad razonable de energía durante la combustión. Este valor es inferior al del RAC 1, lo que indica un potencial energético menor. El oxígeno tiene un valor del 38,64%, lo que es considerablemente alto y podría reducir la densidad energética de la biomasa, ya que parte de este oxígeno ya está vinculado a la estructura de la biomasa y no contribuye directamente al proceso de oxidación. Esto concuerda con lo encontrado por Jenkins, Baxter, Miles Jr y Miles T en 1998 quienes sostienen que un alto contenido de oxígeno en la biomasa generalmente resulta en un menor poder calorífico. Además, Obernberger y Thek en 2004 destacaron que un contenido elevado de materia volátil, como el observado aquí, puede ser favorable para la combustión en sistemas diseñados para manejar altas tasas de volatilización, aunque requiere una adecuada gestión de la combustión para evitar la formación de contaminantes.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del caudal de alimentación el cual tiene una variación de 0 % a 100 % y usando una densidad de aire de 1,161 kg/m^3 se calculó en m^3/s cuanto suministra el ventilador dependiendo la configuración que tenga:

Tabla 5. Caudal de aire de alimentación suministrado por el ventilador.

	Caudal de alimentación	
	Kg/h	**m^3/s**
100 %	127,19	0,0304
80%	121,68	0,0290
60 %	103,41	0,0248
40 %	76,78	0,0184
20 %	46,84	0,0112
0 %	0	0

Observando la tabla 5, se deduce que el caudal de aire de alimentación varía proporcionalmente con el porcentaje de apertura, como se espera en un sistema bien calibrado. A medida que se reduce el porcentaje de apertura del ventilador, el caudal de aire disminuye significativamente. Este descenso es crucial para entender la cantidad de oxígeno disponible para la combustión y cómo se podría ajustar el proceso para diferentes condiciones operativas.

Posteriormente con los datos obtenidos de velocidad de salida y el área de cada damper los cuales se encuentran en la parte de anexos y usando la ecuación 1 se obtuvo el caudal de aire de salida variando el caudal de aire alimentación y la configuración de los dampers. A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 6. Caudal de aire salida del damper 1.

Caudal de alimentación (m^3/s)	**Caudal de salida (m^3/s)**			
	0 % abierto	**50 % abierto**	**75 % abierto**	**100 % abierto**
0,0304	0,0029	0,0029	0,0021	0,0144
0,0290	0,0033	0,0019	0,0012	0,0151
0,0248	0,0023	0,0021	0,0013	0,0139
0,0184	0,0009	0,0013	0,0000	0,0102
0,0112	0,0000	0,0000	0,0000	0,0046

Tabla 7. Caudal de aire salida del damper 2.

Caudal de alimentación (m^3/s)	**Caudal de salida (m^3/s)**			
	0 % abierto	**50 % abierto**	**75 % abierto**	**100 % abierto**
0,0304	0,0096	0,0074	0,0201	0,0223
0,0290	0,0099	0,0073	0,0205	0,0229
0,0248	0,0091	0,0071	0,0190	0,0214
0,0184	0,0063	0,0039	0,0142	0,0159
0,0112	0,0026	0,0014	0,0059	0,0077

Tabla 8. Caudal de aire salida del damper 3.

Caudal de alimentación (m^3/s)	Caudal de salida (m^3/s)			
	0 % abierto	**50 % abierto**	**75 % abierto**	**100 % abierto**
0,0304	0,0312	0,0302	0,0304	0,0153
0,0290	0,0310	0,0294	0,0302	0,0160
0,0248	0,0281	0,0267	0,0269	0,0153
0,0184	0,0184	0,0166	0,0182	0,0120
0,0112	0,0073	0,0081	0,0078	0,0064

Tabla 9. Caudal de aire salida del damper 4.

Caudal de alimentación (m^3/s)	Caudal de salida (m^3/s)			
	0 % abierto	**50 % abierto**	**75 % abierto**	**100 % abierto**
0,0304	0,0376	0,0303	0,0213	0,0109
0,0290	0,0379	0,0297	0,0215	0,0106
0,0248	0,0329	0,0275	0,0197	0,0098
0,0184	0,0224	0,0190	0,0134	0,0072
0,0112	0,0101	0,0072	0,0056	0,0033

Tabla 10. Caudal de aire salida del damper 5.

Caudal de alimentación (m^3/s)	**Velocidad de salida (m^3/s)**			
	0 % abierto	**50 % abierto**	**75 % abierto**	**100 % abierto**
0,0304	0,0340	0,0384	0,0289	0,0113
0,0290	0,0322	0,0381	0,0292	0,0113
0,0248	0,0318	0,0343	0,0259	0,0107
0,0184	0,0211	0,0240	0,0174	0,0074
0,0112	0,0085	0,0093	0,0074	0,0032

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se puede deducir que, el damper 1 muestra un comportamiento peculiar, en aperturas del 0% al 75%, el caudal de salida es muy bajo, pero aumenta considerablemente cuando se abre al 100%. Esto sugiere que el damper 1 está diseñado para funcionar en condiciones donde se necesita una ventilación máxima de manera abrupta, sin proporcionar un control fino en aperturas menores.

El damper 2, por otro lado, es más versátil y sensible a los cambios de apertura, mostrando incrementos graduales en el caudal de salida con cada aumento en la apertura. Este comportamiento lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere un control más preciso y continuo del flujo de aire.

Los dampers 3, 4 y 5 presentan un comportamiento más uniforme, pero de una manera inconsistente, puesto que, el mayor caudal de aire se da en una abertura del 0% disminuyendo hasta 100% abierto, esto se debe a errores en la configuración del sistema al ser construido.

Luego, para la velocidad de alimentación se hicieron pruebas en frio donde se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Peso de la biomasa alimentada (g)
- Tiempo de inicio de la caída (s)
- Tiempo de finalización de la caída (s)

Y usando la ecuación 2 se obtuvo la velocidad de alimentación, a continuación, los resultados:

Tabla 11. Resultados de la Velocidad de Alimentación de Biomasa.

Frecuencia del motor (Hz)	Peso de Biomasa (g)	Tiempo de Inicio (s)	Tiempo de Finalización (s)	Duración de la Caída (s)	Velocidad de alimentación (g/s)
70,5	4250	124,2	332,4	208,2	20,41
60	4250	126	363	237	17,93
50	4250	137,4	429,6	288	14,75
40	4250	144,3	470	325,7	13,05
30	4250	150,2	524	373,8	11,37
20	4250	157,6	596,3	438,7	9,69
10	4250	160	765	605	7,02
5	4250	170	900	730	5,82

Se puede observar una clara relación lineal entre la frecuencia del motor y la velocidad de alimentación de biomasa. A medida que la frecuencia del motor aumenta, la velocidad de alimentación también incrementa de manera proporcional.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos sobre la velocidad de la parrilla móvil.

Tabla 12. Velocidad de la parrilla móvil.

Frecuencia del motor (Hz)	**Tiempo (s)**	**Distancia (m)**
73,3	3600	1
60	4398	1
50	5280	1
40	6600	1

Igual que la velocidad de alimentación se muestra una clara relación lineal entre la frecuencia del motor y la velocidad de la parrilla, es decir, a medida que disminuye la frecuencia del motor también disminuye la velocidad de la parrilla.

Posteriormente con los resultados obtenidos se hicieron los respectivos cálculos para establecer las condiciones operacionales de la línea base para la combustión de cada uno de los RAC.

Primero se calculó la cantidad de biomasa en gramos, necesarios para la combustión teniendo en cuenta las dimensiones del tornillo de alimentación:

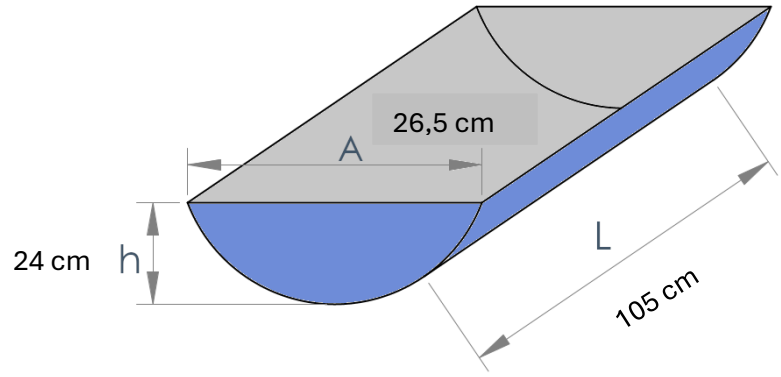

Figura 8. Dimensiones del tornillo de alimentación.

Se calculó el área del semicírculo con la siguiente ecuación:

$$\text{Área} = \frac{1}{2} * \Pi * r^2 \qquad \textbf{Ec. 3}$$

$$\text{Área} = \frac{1}{2} * 3{,}1416 * (13{,}25)^2 = 275{,}59\ \text{cm}^2$$

Posteriormente se encontró el volumen del semicilindro:

$$\text{Volumen} = \text{Área} * \text{Longitud} \qquad \textbf{Ec. 4}$$

$$\text{Volumen} = 275{,}59\ \text{cm}^2 * 105\ \text{cm} = 28937\ \text{cm}^3$$

Teniendo ya el volumen del tornillo y una densidad de la biomasa de 0.86 g/cm^3 se calculó la cantidad de residuos agrícolas que puede contener el tornillo:

$$\text{Masa} = \text{Densidad} * \text{Volumen} \qquad \textbf{Ec. 5}$$

$$\text{Masa} = 0.86\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 28937\ \text{cm}^3 = \ 24{,}8\ \text{Kg} = 24885\ \text{g}$$

Finalmente se determinó la velocidad de alimentación requerida para una combustión de tiempo de 1 hora :

$$\text{Velocidad de alimentación: } \frac{\text{Masa}}{\text{Tiempo}} \qquad \textbf{Ec. 6}$$

$$\text{Velocidad de alimentación: } \frac{24885\ \text{g}}{3600\ \text{s}} = 6{,}9\ \text{g/s}$$

Teniendo este resultado y el de la velocidad de alimentación de las pruebas en frio se eligió una frecuencia del motor del tornillo de alimentación de 10 Hz que equivale a una velocidad de alimentación de 7,02 g/s, un valor bastante cercano al que se necesita que es 6,9 g/s.

Para el cálculo de la inyección de aire necesario para la combustión completa, se utilizó la estequiometria de la reacción de combustión. La inyección de aire necesaria depende de los componentes principales del análisis elemental en base seca, estos datos se encuentran en la Tabla 2 para el RAC 1 y tabla 4 para el RAC 2.

Para el RAC 1 se presentan a continuación los componentes principales:

Carbono (C): 41,05%
Hidrógeno (H): 5,25%
Azufre (S): 0,25%

La combustión completa de los elementos puede ser representada por las siguientes ecuaciones:

Carbono:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \qquad \textbf{Ec. 7}$$

1 mol de C requiere 1 mol de O_2

Hidrogeno:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \qquad \textbf{Ec. 8}$$

2 mol de H_2 requieren 1 mol de O_2

Azufre:

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \qquad \textbf{Ec. 9}$$

1 mol de S requiere 1 mol de O_2

Posteriormente se calculó las moles de Oxigeno necesarias para la quema total de 24885 de biomasa utilizando las masas molares de cada elemento (C: 12 g/mol, H: 1 g/mol, S: 32 g/mol)

Carbono:

$$\text{Masa de C} = \frac{41{,}05\ \%}{100} * 24885\ \text{g} * = 10215\ \text{g}$$

$$\text{Masa de C} = \frac{10215\text{g}}{12\ \text{g/mol}} * 32\ \text{g/mol} = 27256\ \text{g de } O_2$$

Hidrogeno:

$$\text{Masa de H} = \frac{5{,}25\ \%}{100} * 24885\ \text{g} \ = 1306\ \text{g}$$

$$\text{Masa de H} = \frac{1306\ \text{g}}{1\ \text{g/mol}} * 32\ \text{g/mol} = \ 20903\ \text{g de } O_2$$

Azufre:

$$\text{Masa de S} = \frac{0{,}25\ \%}{100} * 24885\ \text{g} \ = 62{,}21\ \text{g}$$

$$\text{Masa de S} = \frac{62{,}21\ \text{g}}{32\ \text{g/mol}} * 32\ \text{g/mol} = \ 62{,}21\ \text{g de } O_2$$

Por último, se sumó el oxígeno necesario de cada elemento:

$$\text{Total de g de } O_2 = 27256\ \text{g (C)} + 20903\ \text{g(H)} + 62{,}21\ \text{g (S)} = 48221{,}8\ \text{g de } O_2$$

$$\text{Total de moles de } O_2 = 1506{,}93\ \text{mol}$$

Dado que el aire contiene aproximadamente un 21% de oxígeno, las moles de aire necesario se muestran a continuación:

$$\text{Mol de aire} = \frac{1506{,}93\ \text{mol } O_2}{0{,}21} = 7175{,}86$$

Con la ecuación de gas ideal se calculó el volumen de aire necesario, suponiendo una temperatura promedio de 25 °C que equivale a 298 °K y presión atmosférica de 101300 Pa que es en la ciudad de Santiago de Cali.

$$PV = nRT \qquad \textbf{Ec. 10}$$

Despejando V:

$$V = \frac{nRT}{P} \qquad \textbf{Ec. 11}$$

Sustituimos valores:

- n = 7175,86 moles
- R = 8,314 J/(mol*K)
- T= 298 K
- P= 101300 Pa

$$V = \frac{7175{,}86 * 8{,}314 * 298}{101300} = \ 175{,}57\ m^3$$

Para la combustión del RAC 1 son necesarios 175,57 m^3, sin embargo, para tener una combustión más completa se decide inyectar un exceso del 30%, dando como resultado un total de 228,24 m^3 de aire.

Luego para una combustión de 1 hora es decir 3600 segundos se calculó el caudal necesario:

$$Q = \frac{V}{Tiempo} \qquad \textbf{Ec. 12}$$

$$Q = \frac{228{,}24\ m^3}{3600s} = \ 0{,}0634\ \frac{m^3}{s}$$

Finalmente se obtuvo que para una combustión completa de 24885 g del RAC 1 son necesarios 0,0634 m^3/s de aire para una combustión de 1 hora. Se decidió usar un caudal de alimentación del 60% para lograr una combustión más controlada. Un caudal mayor podría dar lugar a una combustión incompleta, ya que un exceso muy grande de aire puede enfriar el sistema y provocar turbulencias que afectan la estabilidad de la llama, afectando el proceso.

La configuración de los dampers quedo de la siguiente manera usando únicamente el aire primario del sistema:

Damper 1: 50% abierto = 0,0021 m^3/s

Damper 2: 0% abierto = 0,0091 m^3/s

Damper 3: 100% abierto = 0,0153 m^3/s

Damper 4: 50 % abierto = 0,0275 m^3/s

Damper 5: 100 % abierto = 0,0107 m^3/s

Dando un total de 0,0647 m^3/s de aire, el cual es cercano al necesario y se enfoca en una distribución de aire concentrada mayormente en los dampers 5, 4 y 3, puesto que, es donde inicia el proceso por lo tanto se asegura que el proceso inicie correctamente y se mantenga de manera eficiente.

Posteriormente se realizó el mismo proceso para el RAC 2 donde para la combustión completa de 24885 gramos de biomasa con la composición elemental dada, es necesario 1549,28 moles de oxígeno, lo cual equivale a 7377,52 moles de aire. Se suponen las mismas condiciones de temperatura y presión obteniendo un volumen necesario de 180,38 m^3. De igual forma para una mejor combustión se inyecta un 30% en exceso, dando como resultado 0,0651 m^3/s para una combustión de 1 hora.

La configuración de los dampers se realizó de la misma manera a un caudal de alimentación del 60%:

Damper 1: 75 % abierto = 0,0013 m^3/s

Damper 2: 50 % abierto = 0,0071 m^3/s

Damper 3: 75 % abierto = 0,0269 m^3/s

Damper 4: 75 % abierto = 0,0197 m^3/s

Damper 5: 100 % abierto = 0,0107 m^3/s

Obteniendo un total de 0,0657 m^3/s de flujo de aire, muy cercano al necesario, que de igual forma la inyección de aire va enfocada en los dámpers donde inicia el proceso de combustión.

Finalmente teniendo las condiciones operacionales para la combustión tanto del RAC 1 como del RAC 2 se realizó la prueba de combustión para cada uno, donde se tomaron datos de temperatura y se calculó estequiométricamente los gases de chimenea, los resultados a continuación:

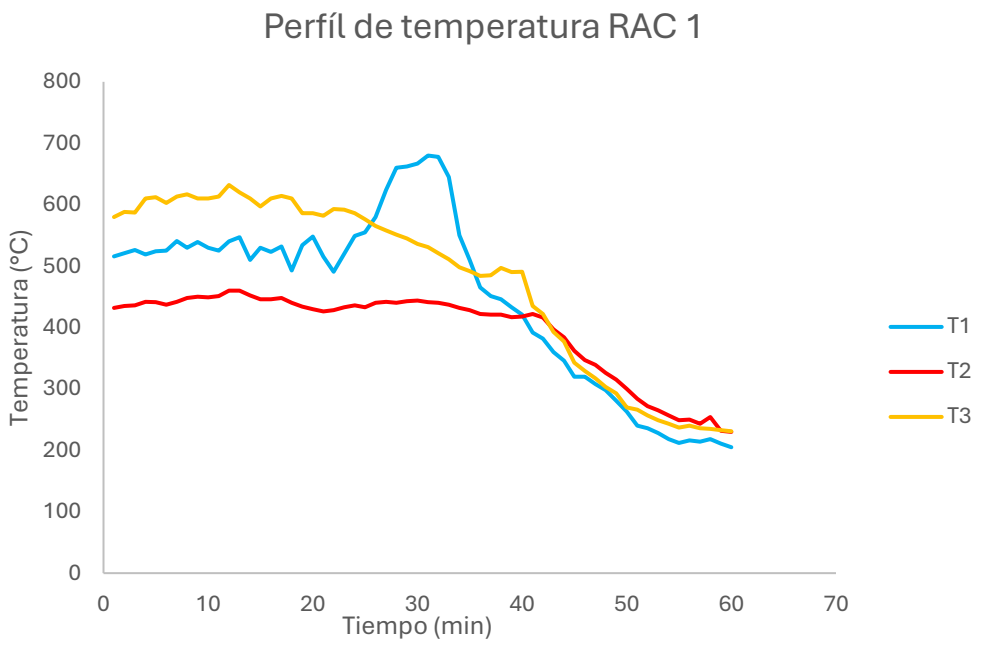

Figura 9. Perfil de temperatura del RAC 1.

La figura 9 muestra el perfil de temperatura para tres puntos diferentes (T1, T2, T3) durante la combustión del RAC 1 a lo largo de 60 minutos. La T1 comienza a aumentar de manera constante, alcanzando un pico alrededor de los 35 minutos, con una temperatura cerca a los 700°C, mientras que la T2 muestra un comportamiento más estable, con una temperatura que se mantiene en torno a los 400°C. Por otro lado, la T3 presenta una temperatura alta inicialmente, con un máximo cerca a los 600°C. Después de este pico, la temperatura disminuye de manera similar a las otras dos curvas, pero con una caída menos pronunciada.

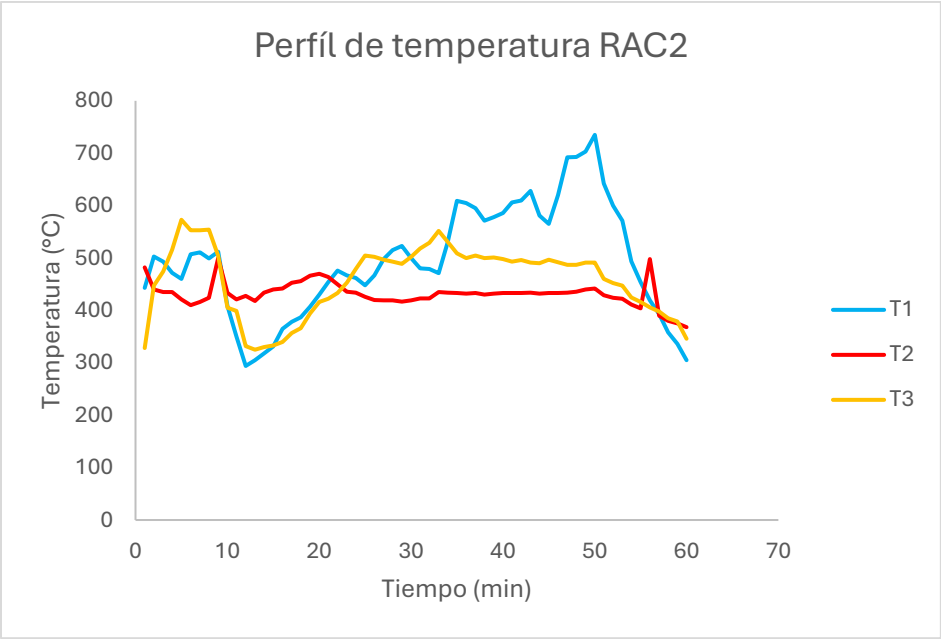

Figura 10. Perfil de temperatura del RAC 2.

La figura 10 muestra el perfil de temperatura para tres puntos diferentes (T1, T2, T3) durante la combustión del RAC 2 a lo largo de 60 minutos La T1 presenta variaciones significativas, alcanzando picos cercarnos a los 700°C presentando caídas bruscas que señalan una distribución irregular del combustible o problemas en la mezcla del aire de combustión. Por otro lado, la T2 muestra una mayor estabilidad en la temperatura, que se mantuvo alrededor de los 400°C durante la mayor parte del tiempo mientras que la T3 estuvo similar a la T1 manteniendo un rango de temperatura generalmente más bajo, oscilando entre 400°C y 600°C.

Analizando comparativamente los perfiles de temperatura del RAC 1 y del RAC 2, se observa diferencias clave en su comportamiento térmico durante la combustión, las cuales pueden estar influenciadas tanto por su composición química como por la configuración de los dampers utilizados para la distribución de aire. El RAC 1, que tiene un 41,05% de carbono, 5,25% de hidrógeno y 0,25% de azufre, fue sometido a una inyección de aire de 0,0647 m^3/s, distribuido en los dampers con mayor apertura en los últimos tramos (dampers 4 y 5), su perfil de temperatura muestra un incremento inicial rápido, seguido de una disminución constante después de alcanzar su pico alrededor de los 40 minutos, lo que podría indicar una

combustión rápida y eficiente en la etapa inicial, pero una posible limitación de oxígeno o un enfriamiento prematuro hacia el final.

Por otro lado, el RAC 2, con una composición ligeramente superior en carbono (41,37%) e hidrógeno (5,55%), y menor contenido de azufre (0,2%), fue sometido a una inyección de aire de 0,0657 m^3/s. En este caso, la distribución del aire fue más uniforme entre los dampers, aunque con una mayor apertura en los dampers intermedios, dando como resultado un perfil de temperatura que presenta fluctuaciones más pronunciadas y un pico de temperatura más prolongado. Por lo tanto, se puede observar que el perfil de temperatura del RAC 2 tuvo una combustión menos uniforme y eficiente en comparación con el RAC 1.

La ligera diferencia en la composición elemental entre los dos RAC también podría haber influido en la combustión. El mayor contenido de hidrógeno en el RAC 2 podría haber favorecido a alcanzar picos más altos de temperatura que el RAC 1, puesto que cuando el hidrogeno se quema en presencia de oxígeno, la reacción química es altamente exotérmica y rápida en comparación de otros componentes.

Estos resultados son consistentes con estudios que destacan la importancia de la correcta distribución del aire y la composición del combustible en la optimización de la combustión en calderas de biomasa (García, Pizarro, Lavín & Bueno; 2019). La variabilidad en la composición de los RAC puede afectar significativamente la eficiencia y el perfil térmico de la combustión, lo que subraya la necesidad de ajustar los parámetros operativos de acuerdo con las características específicas del material a quemar.

Posteriormente se analizó 2000 g las cenizas obtenidas de cada proceso, a continuación, los resultados:

Tabla 13. Análisis cenizas del RAC 1.

Parámetro	Base húmeda	Base seca
Humedad total (%en peso)	2,74	-
Materia Volátil (%en peso)	7,90	8,13
Cenizas (%en peso)	78,02	80,21
Carbono fijo (%en peso)	11,35	11,67

Inquemados	19,24	19,79

Comparando estos resultados con los de la tabla 1 del análisis proximal del RAC 1, se observa que el porcentaje de cenizas después de la combustión ha aumentado de 12,64 % (equivalente a 3144 g) a 80,21%(equivalente a 19960 g). Este cambio no implica que se hayan generado más cenizas en el residuo sólido, puesto que, durante la combustión la mayor parte de los componentes volátiles y carbonosos se convierten en gases y se liberan al ambiente, reduciendo la masa total del residuo y dejando las cenizas como el componente predominante en el material solido restante. Este comportamiento es característico de los procesos de combustión, donde el residuo final se compone en su mayoría de cenizas debido a la eliminación de otros elementos de forma gaseosa.

Para el carbono fijo, la biomasa contiene 15,12 %, lo que equivale a 3762 g y después de la combustión el carbono fijo en los residuos es del 11,67% equivalente a 2901 g, lo que indica que la mayor parte del carbono fijo no se quemó durante el proceso de combustión, aproximadamente el 77% de su masa inicial permanece en el residuo final.

El RAC 1 contenía 17976 g de materia volátil pero después de la combustión solo quedaron 2023 g, lo que significa que 88,7% de la materia volátil fue convertida en gases y liberada durante la combustión.

Tabla 14. Análisis cenizas del RAC 2.

Parámetro	Base húmeda	Base seca
Humedad Total (%en peso)	3,14	-
Materia Volátil (%en peso)	5,13	5,30
Cenizas (%en peso)	76,06	76,46
Carbono fijo (%en peso)	10,67	10,24
Inquemados	22,8	23,54

Comparando estos resultados con la tabla 3 del análisis proximal del RAC 2, se observa que antes de la combustión había 19221 g de materia volátil y después quedaron 1318 g en los residuos, lo que implica que aproximadamente el 93% de la materia volátil se convirtió en gases y liberada durante la combustión.

Para el contenido de cenizas igual que el RAC 1 aumenta significativamente de 11,99% (equivalente a 2983 g) a 76,46% (equivalente a 19027g), un comportamiento típico en procesos de combustión. El carbono fijo presente antes de la combustión equivalente a 2931 g disminuye a 2548 g, lo que significa que una parte se quemó durante la combustión, aunque queda un 86 % en el residuo.

Los resultados muestran un elevado contenido de cenizas y una cantidad significativa de inquemados, lo que indica una combustión ineficiente tanto para el RAC 1 como para el RAC 2. Esto sugiere que gran parte del material combustible no fue completamente oxidado, probablemente debido a una distribución inadecuada del aire. Para mejorar la eficiencia de este proceso, es recomendable ajustar los parámetros de combustión, como el flujo de aire y la velocidad de alimentación de biomasa, con el fin de reducir el porcentaje de inquemados y aumentar la conversión de energía.

Finalmente, para el cálculo estequiométrico de los gases de chimenea del RAC 1, se utilizó el análisis elemental consignado en la tabla 2 y un total de 24885 g de biomasa.

Para el Dióxido de Carbono se usó la ecuación 7, obteniendo:

$$\text{Dioxido de carbono } (CO_2) = \ 10215 \text{ g} * \frac{44 \text{ g/mol de } CO_2}{12 \text{g/mol de C}} = 37454 \text{ g}$$

Para el vapor de agua se usó la ecuación 8, obteniendo:

$$\text{Vapor de Agua } (H_2O) = 1306 \text{ g} * \frac{18 \text{ g/mol de } H_2O}{2 \text{g/mol de H}} = 11754 \text{ g}$$

Para el dióxido de azufre se utilizó la ecuación 9, obteniendo:

$$\text{Dioxido de azufre } (SO_2) = \ 62{,}21 \text{ g} * \frac{64 \text{ g/mol de } SO_2}{32 \text{g/mol de S}} = 124{,}4 \text{ g}$$

Para el RAC 2 se hicieron los mismos cálculos variando el análisis elemental:

Para el Dióxido de Carbono se usó la ecuación 7, obteniendo:

$$\text{Dioxido de carbono } (CO_2) = \ 10298 \text{ g} * \frac{44 \text{ g/mol de } CO_2}{12 \text{g/mol de C}} = 37742 \text{ g}$$

Para el vapor de agua se usó la ecuación 8, obteniendo:

$$\text{Vapor de Agua } (H_2O) = 1379 \text{ g} * \frac{18 \text{ g/mol de } H_2O}{2\text{g/mol de H}} = 12412 \text{ g}$$

Para el dióxido de azufre se utilizó la ecuación 9, obteniendo:

$$\text{Dioxido de azufre } (SO_2) = 49{,}8 \text{ g} * \frac{64 \text{ g/mol de } SO_2}{32\text{g/mol de S}} = 99{,}6 \text{ g}$$

El CO_2 es el principal gas generado durante la combustión del carbono en la biomasa. Para ambos RAC, la producción de CO_2 es elevada, lo que es esperado debido al alto contenido de carbono. En estudios de combustión de biomasa, el CO_2 es siempre el gas más abundante, ya que la biomasa es rica en compuestos carbonados . En RAC 2, debido a un contenido ligeramente mayor de carbono, la producción de CO_2 es ligeramente superior.

El CO_2 es el principal gas de efecto invernadero emitido durante la combustión de biomasa, sin embargo, diversos estudios han demostrado que la quema de biomasa genera menos CO_2 en comparación con los combustibles fósiles como el carbón o el petróleo, debido al menor contenido de carbono y la capacidad de las plantas para reabsorber CO_2 durante la fotosíntesis. (Smith & Brown.2020)

El H_2O es otro subproducto importante debido a la combustión del hidrógeno. La cantidad de vapor de agua es directamente proporcional al contenido de hidrógeno en la biomasa. En el RAC 2, con un mayor contenido de hidrógeno, se observa una mayor producción de H_2O. Según Miller & Johnson en 2019 indican que la combustión de biomasa genera cantidades significativas de vapor de agua, especialmente cuando el contenido de hidrógeno es alto . Aunque esto no representa un problema ambiental grave, puede influir en la eficiencia térmica de los sistemas de combustión .

El SO_2 es un gas perjudicial producido por la combustión del azufre, ya que el SO_2 puede contribuir a la lluvia ácida y otros problemas ambientales. Aunque en las pruebas de combustión se produce en cantidades menores la emisión de SO_2 sigue siendo una preocupación y se deben implementar controles, como filtros de SO_2. En el caso de RAC 1, la producción de SO_2 es ligeramente mayor debido a su contenido superior de azufre.

4 CONCLUSIONES

Ambos RAC presentaron un comportamiento térmico adecuado para la combustión, puesto que, llegaron a temperaturas bastantes altas, pero se observó que las configuraciones de los dampers y la distribución del aire influenciaron significativamente los perfiles de temperatura. El RAC 1, con una configuración más abierta en los dampers cercanos al punto de caída de la biomasa, permitió una mejor mezcla del aire y, por ende, una combustión más completa.

El análisis de cenizas mostro que, aunque ambos RACs produjeron altos porcentajes de cenizas, el RAC 1 tuvo una menor cantidad de inquemados y mayor eficiencia de combustión. Esto indica que el sistema de inyección de aire y la configuración de los dampers en el RAC 1 permitió un proceso más eficiente.

La ligera variación en la composición química de los RAC afectó los perfiles de temperatura, pero no de manera drástica. El contenido de carbono y azufre fue similar en ambos casos, lo que resultó en perfiles de combustión y emisiones de gases comparables, aunque con pequeñas diferencias en la producción de SO_2.

La distribución del aire a través de los dampers fue clave para optimizar la combustión. La mejor configuración se encontró en el RAC 1, donde la combinación de dampers abiertos en puntos clave mejoró la eficiencia de la combustión y redujo las emisiones de gases nocivos. Esta configuración permitió una mejor oxidación del carbono, reduciendo las emisiones de compuestos inquemados.

La combustión de biomasa, cuando se gestiona adecuadamente, puede ser una fuente de energía más limpia y sostenible en comparación con los combustibles fósiles. Sin embargo, para maximizar sus beneficios y minimizar sus impactos negativos, es necesario un enfoque integral que combine la optimización de la combustión, la gestión sostenible de los recursos y el control estricto de las emisiones.

5 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar optimizando la configuración de los dampers para lograr una distribución de aire más efectiva, lo cual mejorará la eficiencia térmica y reducirá las emisiones. Las pruebas deben enfocarse en encontrar un balance óptimo entre la cantidad de aire y la configuración de los dampers para diferentes tipos de biomasa.

Es crucial implementar un sistema de monitoreo continuo de las emisiones para garantizar que los niveles de CO_2, SO_2, NO_x y partículas finas se mantengan dentro de los límites legales y ambientales.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo, C. E. y Rojas, H. D. (2017). Cuantificación del potencial energético de los residuos agrícolas de la caña de azúcar en el departamento de Cundinamarca. Recuperado de: https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6390?show=full

Cenicaña. (2021). Aprovechamiento de la biomasa en el sector de la caña de azúcar. Cenicaña:https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/6-Nicolas-Gil-CENICANA-Presentacion_min_ambiente.pdf

Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Ley 1715. En: Diario Oficial, [en línea]. Recuperado de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html

Congreso de la República. (1993). Ley por la cual se crea el Ministerio del Medio ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Ley 99. En: Diario Oficial, [en línea]. Recuperado de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html

Congreso de la República. (2009). Ley por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Ley 1333. En: Diario Oficial, [en línea]. Recuperado de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1333_2009.html

Constitución política de Colombia (1991). Constitución Política de la República de Colombia. Diario oficial. Recuperado de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html

Contreras S. & Lozano A. (2011). Diseño de un sistema piloto logístico de recolección de residuos agrícolas cañeros en un ingenio del Valle del Cauca. Universidad Autónoma de Occidente. Recuperado de https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/1230/3/TID00368.pdf

Coronel, E. K. (2020). Evaluación del potencial energético de los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar para generar energía en la Empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A (tesis de pregrado). Universidad Nacional "Pedro Ruiz Gallo". Repositorio institucional: https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8225

Correa, S. A. (2016). Análisis teórico en la combustión de biomasa proveniente de cultivos tradicionales en Colombia (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira. Repositorio institucional: https://repositorio.utp.edu.co/items/fa62d61b-3df3-4a67-94f6-c8eff43cf3a5

Cruz, H. D. y Guillén, I. Y. (2019). Residuos agrícolas de caña de azúcar como biomasa alternativa para la generación de energía: caso azucarera La Grecia (tesis de maestría). Corporación Universitaria UNITEC. Repositorio institucional: https://repositorio.unitec.edu/xmlui/handle/123456789/7928

Demirbaş, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science, 30*(2), 219-230. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004

Felfli, F. F., Luengo, C. A., Rocha, J. D., Filipini, R. C., & Alves, J. R. (2005). Characterization of wood chips for power generation in steam engines. *Biomass and Bioenergy, 28*(3), 261-267. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.07.004

Forero, C. (2022). Sistema de combustión a escala piloto.

Galán, X. F. (2016). Potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia (tesis de especialización). Fundación Universidad de América. Repositorio institucional: https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/637

García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2014). Biomass proximate and ultimate analysis for the determination of optimal blends in co-combustion. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 53*(21), 7590-7598. https://doi.org/10.1021/ie500437m

Gómez, J. A.; Sánchez, O. J. y Matallana, L. G. (2021). Procesos de transformación: perspectiva de aprovechamiento para los residuos de la agroindustria del plátano. Revista Producción + Limpia, 16(1), pp 6-30. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9028696

Jáuregui, C. A. y Osorio, D. M. (2016). Análisis socio-jurídico de la problemática ambiental que genera la quema de caña de azúcar de los monocultivos ubicados cerca a la Parcelación de la Hacienda El Castillo vía Cali – Jamundí entre los años 2011 – 2015 (tesis de pregrado). Universidad Libre. Repositorio institucional: https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/9731

Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles Jr., T. R., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology, 54*(1-3), 17-46. https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3

Jurado, E. E.; Aguilar, J. C. y Pescetto, S. N. (2021). Intervención estatal para el control del impacto socioambiental de la quema de caña de azúcar previo a su cosecha en el Perú (tesis de maestría). Universidad del Pacífico. Repositorio institucional: https://repositorio.up.edu.pe/handle/11354/3297

Jurado, O. A. F. y Tejada, N. G. (2020). Una propuesta de regulación estratégica para el problema de la quema de caña de azúcar en el Distrito de La Huaca, Piura, 2015-

2018. Revista Gobierno y Gestión Pública, 7(1), pp 37-60. doi: https://doi.org/10.24265/iggp.2020.v7n1.03

Miller, A., & Johnson, R. (2019). Thermal efficiency and emissions in biomass combustion. Energy Science, 40(2), 113-124.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015). Decreto por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo, Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural. Decreto 1071. En: Diario Oficial, [en línea]. Recuperado de https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Decretos/Decreto%20No.%201071%20de%202015.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 1076. En: Diario Oficial, [en línea]. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/decreto-1076-de-2015/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Banco de indicadores para el proceso de licenciamiento ambiental. Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/listado-de-indicadores-para-la-evaluacion-y-seguimiento-de-impactos-ambientales/

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). Resolución por el cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Resolución 909. En: Diario Oficial, [en línea]. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-909-del-2008/

Ministerio de Salud y Protección Social. (1991). Decreto por el cual se reglamentan parcialmente los títulos III, V, VI, VII y XI de la Ley 09 de 1979, sobre uso y manejo de plaguicidas. Decreto 1843. En: Diario Oficial, [en línea]. Recuperado de https://www.ins.gov.co/Normatividad/Decretos/DECRETO%201843%20DE%201991.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (2012). Resolución por medio de la cual se expide el Reglamento Técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, envases y equipamientos destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para consumo humano. Resolución 683. En: Diario Oficial, [en línea]. Recuperado de https://www.redjurista.com/Documents/resolucion_683_de_2012_ministerio_de_salud_y_proteccion_social.aspx#/

Mora E, Soto A, Muñoz V, Sánchez R, Carrera S, Pérez E. & Landeros E. (2015). Características de las pruebas piloto: revisión de artículos publicados en enfermería. Vol. 14. No. 3. Recuperado de https://docs.bvsalud.org/biblioref/2020/01/1034782/caracteristicas-de-la-prueba.pdf

Muñoz M. (2017). ANÁLISIS TEÓRICO DE LA PRODUCCIÓN PROBABLE DE NOX EN UNA CALDERA BAGACERA CUANDO SE UTILICE RAC COMO COMBUSTIBLE. Cengicaña. Recuperado de https://cengicana.org/files/20170102150925885.pdf

Muñoz, M. (2017). Guía para el aprovechamiento del RAC como un biocombustible. CENGICAÑA. Recuperado de https://cengicana.org/files/20171207164638121.pdf

Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy, 27*(6), 653-669. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006

Orta, V.; Lois, J. A.; Romero, E. M. y Llanes, D. I. (2017). Cogollo de caña de azúcar, una alternativa sustentable de alimentación animal. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 51(2), pp 31-34. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223154251005

Peñaranda, L. V.; Montenegro, S. P. y Giraldo, P. A. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 8(2), pp 141-150. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6285350

Smith, J., & Brown, K. (2020). *Combustion characteristics of biomass fuels: A review*. Journal of Renewable Energy, 35(4), 251-262.

Quintero, L.; Buelvas, L. y Figueroa, O. (2014). Potencial energético de residuos agroindustriales para la producción de energía térmica del departamento del Cesar. Revista AGUNKUYÂA, 4(2), pp 46-57. Recuperado de https://revia.areandina.edu.co/index.php/Cc/article/view/1179

Tauro, R. J.; Caballero, J. L.; Salinas, M. A.; Ghilardi, A. y Arroyo, J. M. (2021). Evaluación del potencial energético de los recursos biomásicos en Honduras. CEPAL. Recuperado de https://www.cepal.org/es/publicaciones/47650-evaluacion-potencial-energetico-recursos-biomasicos-honduras

Triana, O.; León, T. S.; Céspedes, M. I. y Cámara, A. (2014). Caracterización de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar almacenados a granel. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 48(1), pp 65-70. Recuperado de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223131337010

Urbano, L. (2015). Consecuencia ambiental de la quema extensiva de la caña de azúcar. Grafías, (29), pp 81-86. Recuperado de https://revistas.ucp.edu.co/index.php/grafias/article/view/1298

Velázquez B. (2018). Aprovechamiento de la Biomasa para uso energético. Textos académicos universitarios. Recuperado de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/113122/IPP-Velázquez%20-%20Aprovechamiento%20de%20la%20biomasa%20para%20uso%20energético.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Verdezoto, L.; Parco, F.; Jácome, C.; Katan, W. y Mora, A. (2021). Energía renovable a partir de la biomasa de la caña de azúcar. Revista de Investigación Talentos, 8(1), pp 9-26. doi: https://doi.org/10.33789/talentos.8.1.140

7 ANEXOS

Tabla 15. Área externa de los dampers.

Dámper	Largo (m)	Ancho (m)	AREA (m^2)
1	0,105	0,08	0,008
2	0,104	0,08	0,009
3	0,103	0,08	0,008
4	0,104	0,08	0,008
5	0,102	0,08	0,008

Tabla 16. Velocidad de salida del dámper 1.

Caudal de alimentación (Kg/h)	Velocidad de salida (m/s)			
	0 % abierto	50 % abierto	75 % abierto	100 % abierto
127,19	0,34	0,34	0,25	1,72
121,68	0,39	0,23	0,14	1,8
103,41	0,27	0,25	0,16	1,66
76,78	0,11	0,16	0	1,22
46,84	0	0	0	0,55

Tabla 17.Velocidad de salida del dámper 2.

Caudal de alimentación (Kg/h)	Velocidad de salida (m/s)			
	0 % abierto	50 % abierto	75 % abierto	100 % abierto
127,19	1,13	0,87	2,36	2,62
121,68	1,16	0,86	2,4	2,68
103,41	1,07	0,83	2,23	2,51
76,78	0,74	0,46	1,66	1,87
46,84	0,3	0,16	0,69	0,9

.

Tabla 18. Velocidad de salida del dámper 3.

Caudal de alimentación (Kg/h)	Velocidad de salida (m/s)			
	0 % abierto	**50 % abierto**	**75 % abierto**	**100 % abierto**
127,19	3,69	3,58	3,6	1,81
121,68	3,67	3,48	3,58	1,9
103,41	3,33	3,16	3,18	1,81
76,78	2,18	1,97	2,16	1,42
46,84	0,87	0,96	0,92	0,76

Tabla 19. Velocidad de salida del dámper 4.

Caudal de alimentación (Kg/h)	Velocidad de salida (m/s)			
	0 % abierto	**50 % abierto**	**75 % abierto**	**100 % abierto**
127,19	4,46	3,6	2,53	1,29
121,68	4,5	3,52	2,55	1,26
103,41	3,9	3,26	2,34	1,16
76,78	2,66	2,25	1,59	0,85
46,84	1,2	0,85	0,67	0,39

Tabla 20. Velocidad de salida del dámper 5.

Caudal de alimentación (Kg/h)	Velocidad de salida (m/s)			
	0 % abierto	**50 % abierto**	**75 % abierto**	**100 % abierto**
127,19	4,11	4,65	3,5	1,37
121,68	3,9	4,61	3,54	1,37
103,41	3,85	4,15	3,13	1,29
76,78	2,55	2,9	2,1	0,9
46,84	1,03	1,13	0,9	0,39