

**Producción de Hidrógeno a Partir de Biomasa de Maíz Usando Pirolisis y Gasificación con
Bucle Químico**

María Paula Silva Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera de Petróleos

Director

Adan Yovani León Bermúdez

Doctorado en Ingeniería Química, UIS

Codirector

Baharak Sajjadi

Doctora en Ingeniería Química, Universidad de Malaya

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

"Con todo mi amor y gratitud, dedico esta tesis a mi madre, mi pilar; a mi padrastro, por su apoyo incondicional; a mis abuelos, por su sabiduría y aliento; a mi hermano, mi inspiración para demostrar que los sueños se alcanzan con esfuerzo; y a mis queridos perros, testigos de mis noches de estudio."

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que contribuyeron significativamente al desarrollo de esta tesis. En primer lugar, agradezco profundamente a la Dra. Sajjadi por brindarme la invaluable oportunidad de realizar una estancia de investigación en la Universidad de Oklahoma. Mi gratitud se extiende a la Universidad de Oklahoma, donde llevé a cabo la parte experimental de este trabajo, y a la Universidad Industrial de Santander (UIS), mi alma mater, que me formó como ingeniera.

Agradezco especialmente a mi abuelo, Luis Miguel Martínez, por su generoso apoyo económico, el cual fue fundamental para la realización de esta investigación. A Mónica Pegado, estudiante de maestría en la Universidad de Oklahoma, le agradezco su valiosa guía y apoyo en la toma de datos, a la Dra. Sajjadi, le agradezco su asistencia en la preparación de tablas e ilustraciones, al Dr. Adán León, por su lectura crítica y corrección del documento, y al Dr. Germán González Silva por su papel como evaluador de esta tesis.

Finalmente, extendiendo mi agradecimiento a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de esta tesis.

Tabla de contenido

	Pag.
Introducción	10
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Alcance	15
3. Objetivos.....	17
3.1 Objetivo Principal	17
3.2 Objetivos Específicos.....	17
4. Justificación	18
5. Marco teórico	19
5.1. Energía y sostenibilidad en la industria de hidrocarburos	19
5.2. Reactor	20
5.3. Cromatógrafo de gases.....	22
5.4. Biomasa.....	24
5.5. Pirolisis de Biomasa para la producción de Hidrogeno	25
5.6. Gasificación de Biomasa para Producción de Hidrógeno.....	27
5.7. Uso de Catalizadores en la Pirolisis y Gasificación.....	28
5.8. Aplicaciones Industriales y Competitividad Operativa	29
6. Metodología	30
6.1 Descripción del Proceso:.....	31

6.2	Diagrama esquemático del sistema de refinería catalítica de biomasa de lecho fijo	
	32	
6.3	Procedimiento Experimental:.....	33
6.3.1	<i>Preparación de la Biomasa:</i>	33
6.3.2	<i>Preparación del Catalizador:</i>	34
6.4	Eficiencia del catalizador:.....	34
6.5	Condiciones de Operación para la producción de hidrogeno:	36
7.	Análisis de Datos	38
7.1	Catalizador	38
7.2	Pirolisis	41
	Etapa a 650°C	42
	Etapa a 750°C	43
	Etapa a 850°C	44
7.3	Gasificación:	50
8.	Pirolisis y Gasificación	56
9.	Conclusiones.....	58
	Publicaciones derivadas de esta tesis.....	59
10.	Recomendaciones	60
	Referencias bibliográficas.....	61

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Cantidad de mol/kg de biomasa producida por pirolisis para cada condición evaluada	41
Tabla 2 Cantidad de mol/kg de biomasa producida por gasificación para cada condición evaluada	50
Tabla 3 Porcentaje de aumento de la producción de hidrogeno en función del catalizador durante la pirolisis.....	56
Tabla 4 Porcentaje de aumento de la producción de hidrogeno en función del catalizador durante la gasificación.	57
Tabla 5 Porcentaje de aumento de la producción de hidrogeno en función de la metodología utilizada.....	57

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Montaje de lecho fijo.....	22
Figura 2 (GC), Cromatógrafo de Gases	24
Figura 3 Biomasa de rastrojo de maíz	25
Figura 4 Diagrama esquemático del sistema de refinería de biomasa catalítica de lecho fijo. ...	32
Figura 5 transformación de la biomasa a biocarbón	33
Figura 6 Preparación del catalizador	34
Figura 7 Producción de gas por ciclo.....	39
Figura 8 Producción de gas en cada una de las muestras analizadas.....	40
Figura 9 bioaceite y biocarbón resultante de pirolisis a 650°	43
Figura 10 bioaceite y biocarbón resultante de pirolisis a 750°	44
Figura 11 bioaceite y biocarbón resultante de pirolisis a 850°	45
Figura 12 Comparación de la producción de gas: con y sin catalizador durante la pirolisis.....	46
Figura 13 Gases producidos durante la prueba de pirolisis, con y sin catalizador	47
Figura 14 Comparación de las concentraciones de gas evaluadas durante la pirolisis.....	49
Figura 15 Comparación de la producción de gases: con y sin catalizador en gasificación	51
Figura 16 Gases producidos durante la prueba de Gasificación: con y sin catalizador.....	53
Figura 17 Bioproductos sólidos y líquidos obtenidos en el proceso de gasificación de biomasa de maíz.....	54
Figura 18 Comparación de las concentraciones de gas evaluadas durante la gasificación.	55

Resumen

Título: Producción de Hidrógeno a Partir de Biomasa de Maíz Usando Pirolisis y Gasificación con Bucle Químico¹

Autor: María Paula Silva Martínez²

Palabras clave: pirolisis, gasificación, combustión química, hidrogeno, energía.

Descripcion;

La presente investigación aborda la problemática energética y ambiental derivada del uso intensivo de combustibles fósiles, proponiendo la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual de maíz mediante procesos de pirolisis y gasificación con bucle químico. Este enfoque busca integrar tecnologías sostenibles en la industria de hidrocarburos, sector estratégico que enfrenta la necesidad de reducir su huella de carbono sin comprometer la seguridad energética global.

La utilización de biomasa como materia prima se plantea bajo el marco de la economía circular, aprovechando residuos agrícolas para generar un portador energético limpio, eficiente y de alto valor industrial. El estudio se centra en la evaluación experimental a escala de laboratorio, considerando variables críticas como la temperatura de reacción, el flujo de vapor de agua y la incorporación de catalizadores metálicos, con el objetivo de optimizar el rendimiento de hidrógeno y minimizar la generación de subproductos no deseados.

Asimismo, se exploran las ventajas del bucle químico como estrategia para mejorar la eficiencia del proceso y favorecer la captura de CO₂, alineándose con los objetivos internacionales de mitigación del cambio climático. Los resultados obtenidos constituyen un aporte técnico que respalda la viabilidad de integrar esta tecnología en refinerías y plantas petroquímicas, facilitando la transición hacia una matriz energética más diversificada y sostenible.

De este modo, la investigación contribuye al desarrollo de alternativas que fortalezcan la competitividad del sector de hidrocarburos y simultáneamente promuevan la sostenibilidad ambiental y el cumplimiento de compromisos globales en materia energética.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de fisicoquímicas. Escuela de petróleos. Director Adan León. Codirector Baharak Sajjadi

Abstract

Title: Hydrogen Production from Corn Biomass Using Pyrolysis and Chemical Loop Gasification³

Author: María Paula Silva Martínez ⁴

Keywords: pyrolysis, gasification, chemical combustion, hydrogen, energy.

Descripción:

This research addresses the energy and environmental problems derived from the intensive use of fossil fuels, proposing the production of hydrogen from residual corn biomass through pyrolysis and gasification processes with chemical looping. This approach seeks to integrate sustainable technologies in the hydrocarbon industry, a strategic sector that faces the need to reduce its carbon footprint without compromising global energy security.

The use of biomass as a raw material is proposed under the framework of the circular economy, taking advantage of agricultural residues to generate a clean, efficient and high industrial value energy carrier. The study focuses on the experimental evaluation at laboratory scale, considering critical variables such as reaction temperature, water vapor flow and the incorporation of metal catalysts, with the aim of optimizing hydrogen yield and minimizing the generation of unwanted by-products.

Likewise, the advantages of the chemical loop are explored as a strategy to improve process efficiency and favor CO₂ capture, aligning with international climate change mitigation objectives. The results obtained constitute a technical contribution that supports the feasibility of integrating this technology in refineries and petrochemical plants, facilitating the transition towards a more diversified and sustainable energy matrix.

In this way, research contributes to the development of alternatives that strengthen the competitiveness of the hydrocarbon sector and simultaneously promote environmental sustainability and compliance with global energy commitments.

³ Undergraduate Thesis

⁴ School of Physicochemistry. School of Petroleum. Director Adan León. Co-director Baharak Sajjadi

Introducción

A lo largo del siglo XXI, la crisis ecológica ha alcanzado una dimensión global debido al crecimiento poblacional, el uso intensivo de energía y las modalidades de producción industrial que han erosionado significativamente los recursos mundiales. Esta situación refleja una expansión económica que incrementa constantemente la escala, intensidad y naturaleza de la relación de la sociedad con el planeta (Jimenez Herrero, 2018). Como seres humanos, es natural buscar el avance como sociedad a través de los procesos históricos que han impulsado el crecimiento de la visión científica, económica y tecnológica.

Sin embargo, en la búsqueda de una vida más cómoda, también se ha sacrificado el ecosistema que sustenta la vida en la Tierra. A lo largo de las eras, los cambios ambientales globales han sido impulsados por diversas alteraciones naturales, pero en la actualidad, factores como la alta demanda de energía debido al aumento poblacional han acelerado la transformación climática, biológica y geológica. La preocupación ambiental no es nueva; ha sido expresada durante décadas en foros como el Acuerdo de París y la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (UNCCD). Los síntomas de esta crisis planetaria son claros, y su impacto sobre los sistemas ambientales y humanos nos advierte que, si la humanidad no cambia significativamente sus hábitos, el planeta podría sufrir cambios bruscos e irreversibles que comprometerían gravemente la supervivencia de numerosas especies, incluida la nuestra.

A pesar de los desafíos ambientales, la industria energética, en especial la industria de los hidrocarburos se encuentra en la búsqueda y desarrollo de soluciones innovadoras para mitigar su

impacto sin comprometer el suministro energético global. Por lo cual la energía renovable se considera una solución fundamental para abordar el aumento de la temperatura global. Su implementación no solo mejora la seguridad energética y mitiga el cambio climático, sino que también impulsa el desarrollo económico y amplía el acceso a la energía en áreas rurales y alejadas de las grandes ciudades (Panwar *et al.*, 2011).

Dentro del ámbito de la energía renovable, la producción de hidrógeno ha captado un gran interés en la industria energética por su potencial como combustible limpio y eficiente, en especial para la industria de hidrocarburos. El uso de hidrógeno no solo podría mejorar la eficiencia de los procesos, sino también reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la transición hacia una energía más sostenible. Tradicionalmente, el hidrógeno se ha obtenido mediante el reformado con vapor de gas natural, lo cual genera importantes emisiones de CO₂. Sin embargo, han surgido alternativas más sostenibles como la conversión de biomasa a través de pirolisis y gasificación (con la adición de vapor de agua y nitrógeno), que ofrece una alternativa más sostenible. En la industria de hidrocarburos, este enfoque permitiría reducir las emisiones y aprovechar residuos agrícolas como fuente de energía, mejorando la eficiencia de procesos como la hidrosulfuración y el craqueo catalítico, que dependen de grandes volúmenes de hidrógeno (Ren *et al.*, 2019).

El uso de biomasa residual, como el maíz, representa una oportunidad significativa en este contexto. Mediante pirolisis y gasificación, es posible descomponer la biomasa en hidrógeno y otros gases útiles. Estudios recientes demuestran que la temperatura y el flujo de vapor de agua juegan un papel crucial en la optimización de estos procesos, con temperaturas elevadas (800°C) favoreciendo una mayor producción de hidrógeno. Además, la adición de catalizadores, como

$Ca_2Fe_2O_5$, incrementa significativamente el rendimiento del hidrógeno, inhibiendo la formación de compuestos no deseados como el carbón filamentosos (Sun, Chen, Hu, et al., 2018).

Esta tecnología puede integrarse en las refinerías y plantas petroquímicas para producir hidrógeno de forma más limpia y eficiente, ayudando a reducir la dependencia de fuentes fósiles y disminuyendo las emisiones de CO_2 . Además, el uso de nitrógeno y vapor de agua en estos procesos mejora la eficiencia global del sistema, permite la conversión de materiales orgánicos en gas de síntesis, compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Posteriormente, el hidrógeno puede ser separado y purificado para su uso como fuente de energía limpia (Sun, Chen, Hu, et al., 2018).

El concepto de bucle químico se basa en una serie de sub-reacciones que ocurren en reactores aislados, donde los portadores sólidos transportan oxígeno entre los reactores de reducción y oxidación para cerrar el ciclo (Liu *et al.*, 2019). Este sistema no solo mejora la eficiencia de la producción de hidrógeno, sino que también captura y utiliza el CO_2 de manera efectiva, contribuyendo significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este enfoque, por tanto, ofrece una solución viable y sostenible para la industria de hidrocarburos, para continuar suministrando energía confiable y a su vez alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y protección ambiental (Objetivos de desarrollo sostenible, ODS).

Esta investigación se centra en evaluar la viabilidad técnica de la producción de hidrógeno a partir de biomasa con captura de carbono, analizando su potencial para integrarse en la industria del petróleo y gas como una alternativa sostenible y de bajas emisiones. De este modo, la adopción de estas tecnologías permitiría a esta industria continuar diversificando sus fuentes energéticas y

reduciendo su huella de carbono sin perder relevancia como sector clave. La implementación de estas tecnologías puede no solo diversificar las fuentes de energía, sino también ayudar a la industria a cumplir con objetivos ambientales y normativos cada vez más estrictos.

1. Planteamiento del problema

En el contexto de la creciente demanda energética y la actual preocupación por el impacto climático, es altamente visible que la industria de los hidrocarburos se enfrenta a un desafío significativo: seguir siendo una fuente clave de energía mientras se adapta a las exigencias de sostenibilidad y la reducción de emisiones. El cambio climático y la degradación ambiental son retos globales que requieren soluciones innovadoras para limitar el aumento de la temperatura global a menos de 1.5°C sobre niveles preindustriales, como lo establece el Acuerdo de París. Sin embargo, las tecnologías renovables actuales no están implementadas a la velocidad ni a la escala necesarias para cumplir con estos objetivos (Panwar *et al.*, 2011).

Ahora bien, los hidrocarburos como una fuente de energía predominante no son incompatibles con los esfuerzos de mitigar el cambio climático. Un ejemplo de esta integración se refleja en la creciente demanda de hidrógeno, impulsada por su potencial como portador de energía limpia al igual que por su papel en la industria petroquímica como reactivo esencial. Este recurso se utiliza ampliamente en procesos fundamentales para la producción de combustibles más limpios

y la reducción de impurezas en productos derivados del petróleo como la hidrodeshulfuración y el craqueo catalítico (Ren *et al.*, 2019).

Para lograr la integración del hidrogeno como herramienta de mitigación del cambio climático se deben elegir procesos para su producción con la capacidad de aprovechar recursos renovables. Debido a esto se elige la pirolisis y la gasificación para la producción de hidrógeno a partir de biomasa. Además, estos métodos permiten un control más preciso de las condiciones de reacción, lo que puede optimizar la producción de hidrógeno y minimizar la generación de subproductos no deseados, como el dióxido de carbono y los hidrocarburos ligeros (Sun *et al.* 2018a). La integración de estas tecnologías en la industria de hidrocarburos no solo contribuiría a la reducción de la huella de carbono de esta industria, también mejoraría su competitividad operativa al diversificar sus fuentes de energía y reducir su exposición a las fluctuaciones del mercado de combustibles fósiles.

El principal problema que aborda esta tesis es la producción de hidrogeno para suplir la creciente demanda en la industria de hidrocarburos. Esto resulta especialmente relevante en la industria de hidrocarburos que busca reducir su huella de carbono sin comprometer su competitividad operativa.

Debido a esto, el uso de biomasa residual, como la del maíz, tiene el potencial de proporcionar una fuente renovable para la producción de hidrógeno. No obstante, este enfoque presenta varios retos técnicos como; la eficiencia del proceso; el control de variables críticas como la inyección de vapor de agua y nitrógeno; y la optimización de la producción de hidrógeno minimizando la generación de subproductos no deseados como el CO₂ y los hidrocarburos ligeros.

Este estudio se limita a la experimentación a escala de laboratorio, lo que permite un mayor control sobre las condiciones experimentales. De esta forma, el enfoque experimental permitirá entender cómo las variables operativas (temperatura, flujo de vapor y uso de catalizadores) afectan la eficiencia de la producción de hidrógeno a pequeña escala, proporcionando las bases para futuras aplicaciones industriales.

En este sentido, los experimentos de laboratorio, mediante técnicas como la cromatografía de gases (CG), se centrarán en optimizar la conversión de biomasa de maíz en hidrógeno bajo condiciones controladas y en minimizar los productos no deseados. El desafío consiste en lograr que este proceso sea económicamente viable y tecnológicamente eficiente para su posible implementación en la industria de hidrocarburos, donde se requerirá escalar los resultados a nivel industrial. Con lo anterior surge la siguiente pregunta del problema ¿Cuál es el efecto de las condiciones de pirolisis y gasificación con Bucle Químico sobre la biomasa del maíz para la producción de hidrógeno?

2. Alcance

El presente estudio se llevó a cabo en un período de seis meses y se centró en una evaluación técnica detallada de la producción de hidrógeno a partir de biomasa, utilizando un catalizador específico en los procesos de pirolisis y gasificación con bucle químico. El objetivo principal fue determinar la cantidad de hidrógeno que puede producirse bajo diferentes

condiciones operativas y optimizar el rendimiento del proceso. Para lograr, el estudio comenzó con la selección y preparación del tipo de biomasa que se utilizó en los experimentos, asegurando que cumpliera con las características adecuadas para los procesos seleccionados. Además, se desarrolló y caracterizó un catalizador metálico específico, evaluando su estructura y propiedades fisicoquímicas para garantizar su efectividad en los procesos. Se procedió también con la configuración del cromatógrafo de gases, con el fin de analizar con precisión los productos gaseosos generados durante las pruebas.

En la fase experimental, se realizaron pruebas controladas de pirólisis y gasificación con bucle químico en un entorno de laboratorio, variando parámetros clave como la temperatura, el flujo de reactantes y la concentración del catalizador, con el objetivo de maximizar la eficiencia en la producción de hidrógeno. Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de técnicas innovadoras de captura de carbono para evaluar su eficiencia en la reducción de emisiones de CO₂ durante el proceso. La caracterización de los productos gaseosos se realizó mediante el uso del cromatógrafo de gases, el cual permitió la identificación y cuantificación precisa de los componentes del gas de síntesis, haciendo especial énfasis en la pureza y cantidad del hidrógeno producido bajo distintas condiciones experimentales.

Los datos obtenidos se analizaron para identificar las condiciones operativas óptimas que permitieron maximizar la producción de hidrógeno y reducir la formación de subproductos no deseados. Además, se evaluó el rendimiento del catalizador y del sistema de captura de carbono para identificar posibles mejoras en la tecnología empleada. Finalmente, los hallazgos experimentales se compilaron para incluir las metodologías utilizadas, los resultados obtenidos y las conclusiones del estudio.

3. Objetivos

3.1 Objetivo Principal

Analizar la producción de hidrógeno a partir de biomasa de maíz usando pirolisis y gasificación con bucle químico

3.2 Objetivos Especificos

- Comprender el comportamiento de las variables del proceso de pirolisis y gasificación sobre la conversión de biomasa residual de maíz mediante revisión bibliográfica.
- Evaluar el proceso de pirolisis y gasificación sobre biomasa residual de maíz para la obtención de H₂ mediante pruebas experimentales a escala laboratorio.
- Determinar la eficiencia de los productos obtenidos en el proceso de pirolisis y gasificación sobre la biomasa residual de maíz mediante análisis de cromatografía de gases (CG).

4. Justificación

La crisis ecológica del siglo XXI, marcada por el crecimiento poblacional y la explotación intensiva de recursos, ha exigido una reevaluación profunda de nuestras fuentes de energía (Pérez Sánchez, 2010). El avance científico y tecnológico ha llevado a mejoras significativas en la calidad de vida, pero también ha tenido un costo ambiental considerable. Para abordar estos desafíos, la industria de los hidrocarburos está explorando soluciones innovadoras que puedan mantener el suministro energético mientras se reducen las emisiones de carbono y se mejora su sostenibilidad.

En este contexto, el hidrógeno ha emergido como un vector energético clave para la transición hacia fuentes de energía más limpias. La producción de hidrógeno a través de métodos más sostenibles, como la pirolisis y la gasificación de biomasa, ofrece una alternativa viable al tradicional reformado con vapor de gas natural, que genera altas emisiones de CO₂ (Panwar et al., 2011). Este enfoque no solo tiene el potencial de reducir significativamente la huella de carbono de la industria de hidrocarburos, sino que también puede mejorar su competitividad operativa al diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

La biomasa residual, como el maíz, resalta como una fuente renovable prometedora para la producción de hidrógeno. Estudios han demostrado que mediante pirolisis y gasificación, es posible producir hidrógeno de manera eficiente y con menores emisiones de CO₂ (Sun, Chen, Russell, et al., 2018). Además, la integración de catalizadores puede optimizar la producción de hidrógeno, minimizando la formación de subproductos no deseados.

La implementación de estas tecnologías en las refinerías y plantas petroquímicas contribuiría a la sostenibilidad ambiental, la estabilidad y la competitividad operativa del sector. En particular, los procesos como la hidrosulfuración y el craqueo catalítico, que requieren grandes volúmenes de hidrógeno, podrían beneficiarse de fuentes más limpias y sostenibles de este gas. En este sentido, la producción de hidrógeno a partir de biomasa con captura de carbono puede ser una solución integral para la industria de hidrocarburos, ayudando a la mitigación del impacto ambiental sin comprometer la eficiencia operativa ni el suministro energético. La adopción de estas tecnologías permitiría a esta industria diversificar sus fuentes energéticas, reducir su huella de carbono y alinearse con los objetivos globales de sostenibilidad (Ren et al., 2019).

5. Marco teórico

5.1. Energía y sostenibilidad en la industria de hidrocarburos

La industria de los hidrocarburos es actualmente una de las principales fuentes de energía a nivel mundial. Desempeña un rol crucial en el suministro de energía para sectores como el transporte, la generación eléctrica y la industria petroquímica (EIA 2020). Sin embargo, esta dependencia plantea desafíos significativos en el contexto de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. El Acuerdo de París (2015) subraya la necesidad de reducir las emisiones de gases

de efecto invernadero para limitar el calentamiento global a menos de 1.5°C por encima de los niveles preindustriales, una meta que requiere la implementación de tecnologías de bajo. En este sentido, la industria de los hidrocarburos enfrenta la presión de adaptarse a prácticas más sostenibles sin comprometer su capacidad de producción energética. La transición a tecnologías alternativas, como la producción de hidrógeno a partir de biomasa, se presenta como una solución potencial para reducir la huella de carbono de la industria y cumplir con los objetivos climáticos

5.2. Reactor

Un reactor es un equipo fundamental en ingeniería química que permite realizar reacciones químicas de manera controlada para transformar reactivos en productos deseados. En un reactor, se pueden manejar variables como la temperatura, presión y composición, optimizando las condiciones para maximizar la eficiencia de la reacción y minimizar subproductos indeseados (Situmorang et al. 2020a). Este equipo es esencial en aplicaciones industriales, como en la producción de hidrógeno mediante pirolisis y gasificación de biomasa, donde es necesario mantener condiciones específicas para lograr una conversión eficiente de biomasa en gases combustibles (Ren et al. 2019).

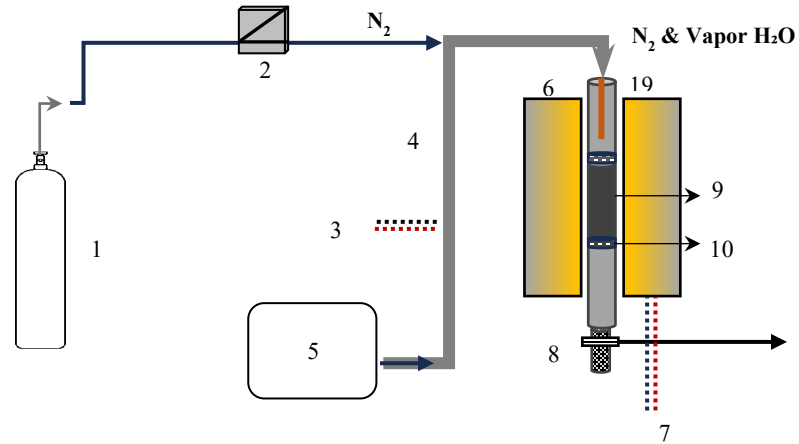
Existen varios tipos de reactores en función de su diseño y la forma en que manejan los reactivos y productos. De acuerdo con Basu (2018), los principales tipos de reactores incluyen:

1. Reactor de tanque agitado continuo (CSTR): Utilizado cuando se requiere una mezcla constante de reactivos y productos. Este reactor asegura una homogeneidad en la mezcla y permite un flujo continuo, ideal para procesos líquidos.
2. Reactor tubular: Utiliza un flujo de reactivos en una dirección, manteniendo una gradiente de temperatura y concentración a lo largo del tubo. Es común en reacciones a altas temperaturas y presiones.
3. Reactor de lecho fijo: Contiene un lecho de catalizador sólido a través del cual pasan los reactivos. Es ideal para reacciones heterogéneas en las que el catalizador no se mueve.
4. Reactor de lecho fluidizado: El catalizador está en un estado semisólido o "fluidizado" por un gas o líquido, lo cual mejora la transferencia de masa y calor, útil en procesos de gasificación.

En el caso de la pirolisis o gasificación de biomasa se puede utilizarse un reactor vertical de lecho fijo que no requiere movimiento ni agitación mecánica. Este tipo de reactor es ideal para procesos que operan en un entorno de gas desplazante como, nitrógeno o vapor de agua. Además, permite que la biomasa se caliente de manera uniforme a lo largo del lecho. De esta manera se favorece la reacción a temperaturas como 650°C, 750°C y 850°C sin necesidad de agitación. Adicionalmente, al mantener la biomasa en un lecho estático se logra un control eficiente de las variables del proceso (Situmorang et al. 2020b). Debido a esto es adecuado para condiciones industriales donde la estabilidad y la eficiencia del reactor son críticas (ver figura 1).

Figura 1

Montaje de lecho fijo.



(1) Cilindro de N₂; (2) regulador de caudal; (3) regulador de temperatura de la cinta calefactora; (4) cinta calefactora; (5) bomba de jeringa HPLC 0. 1 - 10 ml/min; (6) horno de lecho fijo y reactor tubular de cuarzo; (7) controlador de temperatura del horno; (8) colector de bioaceite; (9) muestra de biomasa; (10) tapón de muestra (19) sensor térmico en línea.

5.3. Cromatógrafo de gases

Un cromatógrafo de gases⁵ es un equipo de laboratorio que permite la separación, identificación y cuantificación de componentes en una mezcla de gases o vapores. Este equipo es ampliamente utilizado en química analítica para analizar muestras complejas, como los productos

⁵ GC, por sus siglas en inglés

de pirolisis y gasificación de biomasa, o para detectar compuestos orgánicos volátiles en aplicaciones ambientales, industriales y de investigación (McNair, Miller, y Snow 2019).

En un cromatógrafo de gases, la muestra a analizar se inyecta en una corriente de gas portador en este estudio se utilizó Argón. Dicha corriente de gas transporta la muestra a través de una columna llena de material estacionario. Los diferentes compuestos de la muestra interactúan de manera única con la fase estacionaria de la columna, lo que les hace moverse a distintas velocidades y separarse a lo largo de la columna. Los compuestos separados llegan a un detector que genera una representación gráfica de la señal del detector en función del tiempo conocida como cromatograma. Cada pico en el cromatograma representa un componente diferente de la mezcla, lo que permite identificar y cuantificar la concentración de cada componente basándose en su tiempo de retención y la intensidad de su señal.

El cromatógrafo de gases es esencial en aplicaciones industriales como la producción de hidrógeno porque permite monitorear y optimizar la composición de los gases producidos en procesos de pirolisis y gasificación. En el contexto de la industria de hidrocarburos el GC ayuda a verificar la eficiencia de los reactores, evaluar la efectividad de los catalizadores y controlar la calidad del hidrógeno y otros gases combustibles generados. Así se asegura el cumplimiento de los estándares de pureza y eficiencia requeridos (Grob y Barry 2004). A manera de ejemplo, en la figura 2 se muestra un Cromatógrafo de gases marca Shimadzu (Ref. GC-2014).

Figura 2

(GC), Cromatógrafo de Gases

**5.4. Biomasa**

Biomasa es materia orgánica rica en carbono, que incluye residuos vegetales y animales. Este tipo de materia es considerada una fuente de energía renovable debido a su capacidad para ser utilizada en la generación de calor y electricidad, así como en la producción de biocombustibles. La biomasa puede ser transformada a través de diversas tecnologías como la combustión, la fermentación y la digestión anaeróbica. Esto permite su conversión en energía útil y contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles.

El rastrojo de maíz es uno de los subproductos más relevantes como biomasa en el sector agrícola. Se refiere a los restos de la planta de maíz que permanecen en el campo después de la cosecha. El rastrojo incluye elementos como tallos, hojas, y mazorcas que no son recolectadas durante el proceso de cosecha.

El rastrojo de maíz es importante porque; contribuye a la fertilidad del suelo al descomponerse y liberar nutrientes esenciales; permite un manejo más eficiente de los residuos agrícolas; utilizado como forraje para la alimentación del ganado; y se puede convertir en biocombustibles (Karlen et al. 2009). En la figura 3 se ilustra el proceso de molienda y tamizado requerido en la biomasa.

Figura 3

Biomasa de rastrojo de maíz



5.5. Pirolisis de Biomasa para la producción de Hidrogeno

La pirolisis de biomasa es un proceso termoquímico en el cual la biomasa se descompone a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. El proceso produce: gases (principalmente hidrógeno y monóxido de carbono), líquidos (bioaceites) y sólidos (biochar o carbón vegetal). Este proceso

ocurre en rangos de temperatura que van típicamente de 400°C a 900°C, y su perfil de productos depende tanto de la temperatura como del tiempo de residencia y las condiciones atmosféricas del reactor (Sun et al. 2018b).

Para procesos industriales como el refinamiento de hidrocarburos y otros procesos petroquímicos se utiliza ampliamente el hidrogeno. Es por ello por lo que se requieren condiciones de operación específicas para maximizar la producción de gases ricos en hidrogeno. Para cumplir la demanda, la pirolisis de biomasa se realiza en temperaturas elevadas como 650°C, 750°C y 850°C. A estas temperaturas, la biomasa se convierte rápidamente en un gas que contiene principalmente hidrógeno, monóxido de carbono y algunos hidrocarburos ligeros, minimizando la producción de líquidos y sólidos (Basu 2018; Sun et al. 2018c).

En este caso, se utiliza nitrógeno como gas desplazante. Esto asegura un entorno libre de oxígeno fundamental para evitar la oxidación del material de biomasa y maximizar la conversión hacia productos gaseosos en lugar de cenizas o dióxido de carbono. Además, es apoyado por la inclusión de Ca_2FeO_5 como catalizador. Así, el Ca_2FeO_5 ayuda a aumentar el rendimiento de hidrógeno, y minimiza la formación de subproductos no deseados como los hidrocarburos ligeros y los alquitranes, que pueden ensuciar el reactor y reducir la eficiencia del proceso a escala industrial (Liu et al. 2019).

5.6. Gasificación de Biomasa para Producción de Hidrógeno

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico en el que la biomasa se convierte en un gas sintético⁶ compuesto principalmente por hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO), pequeñas cantidades de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). En contraste con la pirolisis, la gasificación se realiza en presencia de agentes gasificantes, como el vapor de agua, que permiten una conversión más completa de la biomasa en gases combustibles. Este proceso tiene un potencial importante en la industria de hidrocarburos ya que el syngas producido puede usarse como fuente de hidrógeno o como insumo en la síntesis de productos químicos y combustibles, lo que ofrece una alternativa a los combustibles fósiles convencionales.

Para aplicaciones industriales, la gasificación se realiza a temperaturas elevadas, típicamente entre $650^{\circ}C$ y $850^{\circ}C$, y en un entorno controlado en el que se inyectan nitrógeno y vapor de agua como gases desplazantes, evitando así la presencia de oxígeno y minimizando la formación de subproductos indeseados, como CO_2 . En estas condiciones, el vapor de agua reacciona con el carbono presente en la biomasa para producir hidrógeno y monóxido de carbono a través de reacciones endotérmicas que se favorecen a altas temperaturas. El nitrógeno, al ser un gas inerte, actúa como gas de arrastre, ayudando a desplazar los productos gaseosos sin intervenir en las reacciones químicas

⁶ El gas sintético es conocido como *syngas*.

5.7. Uso de Catalizadores en la Pirolisis y Gasificación

El uso del catalizador $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ en los procesos de pirolisis y gasificación de biomasa se basa en sus propiedades únicas para mejorar la eficiencia de conversión y optimizar la producción de hidrógeno en entornos industriales. Este catalizador, compuesto de óxidos de calcio y hierro, aporta beneficios clave en ambos procesos debido a su estabilidad térmica y su capacidad para facilitar reacciones específicas, minimizando al mismo tiempo la formación de subproductos indeseados.

En la pirolisis, el $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ actúa promoviendo la ruptura de enlaces en compuestos orgánicos pesados de la biomasa, lo cual facilita una mayor liberación de hidrógeno. Esto es particularmente importante en procesos sin oxígeno, donde el catalizador permite que la reacción ocurra a menor energía de activación, optimizando la descomposición de moléculas de carbono sin generar contaminantes como el CO_2 o hidrocarburos complejos que reducirían la pureza del gas.

En la gasificación, el $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ favorece la reacción de desplazamiento de gas-agua (water-gas shift), que convierte el monóxido de carbono en hidrógeno y dióxido de carbono en presencia de vapor de agua. Esto no solo incrementa la producción de hidrógeno, sino que también ayuda a ajustar la relación H_2/CO en el syngas final, haciéndolo más adecuado para aplicaciones petroquímicas. Además, este catalizador disminuye la formación de alquitrán y otros subproductos pesados, lo cual es ventajoso en un entorno de gasificación a temperaturas de 750°C y 850°C , donde el control de impurezas es fundamental para la estabilidad del proceso industrial.

La elección del $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ también es estratégica debido a la accesibilidad y costo moderado de sus componentes. Comparado con otros catalizadores que requieren metales preciosos, el $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ofrece una solución más económica sin comprometer la eficiencia. Además, su resistencia a la sinterización y a la desactivación térmica lo hace adecuado para condiciones severas y continuas, propias de las industrias de hidrocarburos, donde la durabilidad y la eficiencia sostenida son esenciales.

5.8. Aplicaciones Industriales y Competitividad Operativa

La producción de hidrógeno a través de los procesos de pirolisis y gasificación de biomasa representa una oportunidad estratégica en aplicaciones industriales, particularmente dentro de la industria de los hidrocarburos. Estos métodos permiten la generación de hidrógeno de manera más sostenible mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos o biomasa como materia prima en lugar de combustibles fósiles tradicionales. Este enfoque no solo contribuye a la reducción de la huella de carbono de la industria, sino que también diversifica las fuentes de insumos energéticos, haciéndola menos dependiente de las variaciones en el mercado de combustibles fósiles y facilitando el cumplimiento de regulaciones ambientales cada vez más estrictas

En términos de competitividad operativa, estos procesos ofrecen varias ventajas. La pirolisis y la gasificación de biomasa producen hidrógeno y otros gases combustibles que pueden usarse de inmediato en procesos industriales como el refinado de hidrocarburos y la generación de energía, mejorando la eficiencia del proceso al reducir los costos asociados con el transporte y almacenamiento de combustibles externos. La integración de estas tecnologías en las operaciones

permite a las empresas de hidrocarburos adaptarse a las demandas del mercado y a los objetivos de sostenibilidad sin comprometer la eficiencia energética de sus plantas ni la calidad de sus productos finales.

La capacidad de estos procesos para convertir biomasa en hidrógeno a altas temperaturas (650°C, 750°C y 850°C), particularmente cuando se usa un catalizador adecuado como el $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, permite una producción de hidrógeno eficiente y continua, alineada con las demandas industriales de gran escala. Esto reduce los costos y optimiza los tiempos de producción, características esenciales para la competitividad en una industria tan exigente como la de hidrocarburos. Además, al generar hidrógeno de manera local y sostenible, las empresas pueden reducir su exposición a las fluctuaciones del mercado global de energía y mejorar su capacidad de respuesta frente a cambios regulatorios y ambientales, lo cual es crucial para mantener su competitividad en el futuro.

6. Metodología

Primeramente, es necesario llegar a comprender el proceso a tomar en cuenta el proceso de pirolisis y gasificación de biomasa teniendo en cuenta que variables son importantes para el éxito de la investigación

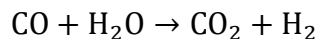
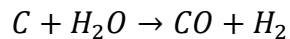
6.1 Descripción del Proceso:

Selección de la materia prima a analizar: Biomasa que resulta en la producción de gases, líquidos (bio-aceite) y sólidos (bio-carbón)

Agentes gasificantes: Nitrógeno (N₂) se utiliza como gas portador inerte, el cual para transportar los gases producidos y controlar las condiciones del reactor mas no participa en las reacciones químicas, y vapor de agua (H₂O) puede actuar como agente gasificante.

Reacciones por analizar:

- a) Pirólisis: para producir gases como hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄).
- b) Gasificación: Incrementa la producción de hidrógeno mediante la conversión:



Catalizadores: Ayudan a minimizar la formación de alquitrán y otros subproductos no deseados y aumentan la tasa de reacciones de gasificación mejorando la eficiencia y selectividad hacia el hidrogeno.

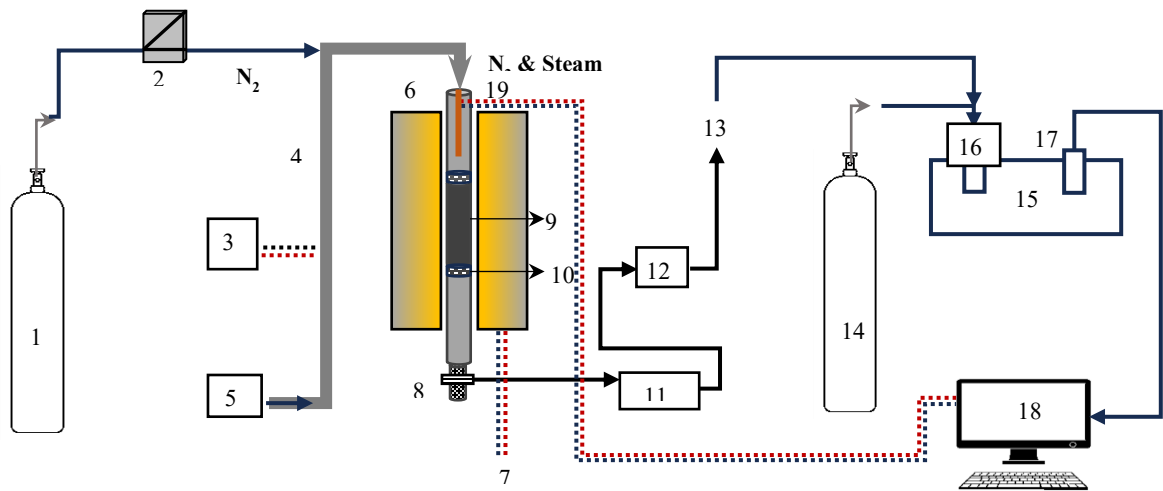
Reactor: Un horno de lecho fijo, el cual es un tipo de reactor en el que el material reactivo (biomasa en este caso) se coloca en un lecho fijo y se calienta desde fuera o mediante el paso de un gas caliente.

6.2 Diagrama esquemático del sistema de refinería catalítica de biomasa de lecho fijo

Siguiendo con el procedimiento se requiere evaluar el mejoramiento de la obtención de H₂ durante el proceso de Syngas mediante pruebas experimentales a escala laboratorio, al variar la temperatura y analizar cómo reacciona la biomasa libre y con adición del catalizador seleccionado a una condición de presión estable (ver figura 4).

Figura 4

Diagrama esquemático del sistema de refinería de biomasa catalítica de lecho fijo.



(1) Cilindro de N₂; (2) regulador de caudal; (3) regulador de temperatura de la cinta calefactora; (4) cinta calefactora; (5) bomba de jeringa HPLC 0. 1 - 10 ml/min; (6) horno de lecho fijo y reactor tubular de cuarzo; (7) controlador de temperatura del horno; (8) colector de bioaceite; (9) muestra de biomasa; (10) tapón de muestra; (11) botella de lavado de gas; (12) filtro de membrana; (13) bolsas de gas; (14) botella de argón; (15) cromatógrafo de gases, Shimadzu; (16) puerto de inyección split/spitless; (17) detector de conductividad térmica; (18) ordenador con software Lab solutions; (19) sensor térmico en línea.

6.3 Procedimiento Experimental:

6.3.1 Preparación de la Biomasa:

Fuente de biomasa: Para los experimentos se eligió el rastrojo de maíz, hojas, tallos y mazorcas de plantas de maíz que quedan en el campo después de la cosecha. (Suministrado por el El Laboratorio Nacional de Idaho (INL) es administrado por Battelle Energy Alliance (BEA) para la Oficina de Energía Nuclear del Departamento de Energía de los Estados Unidos.)

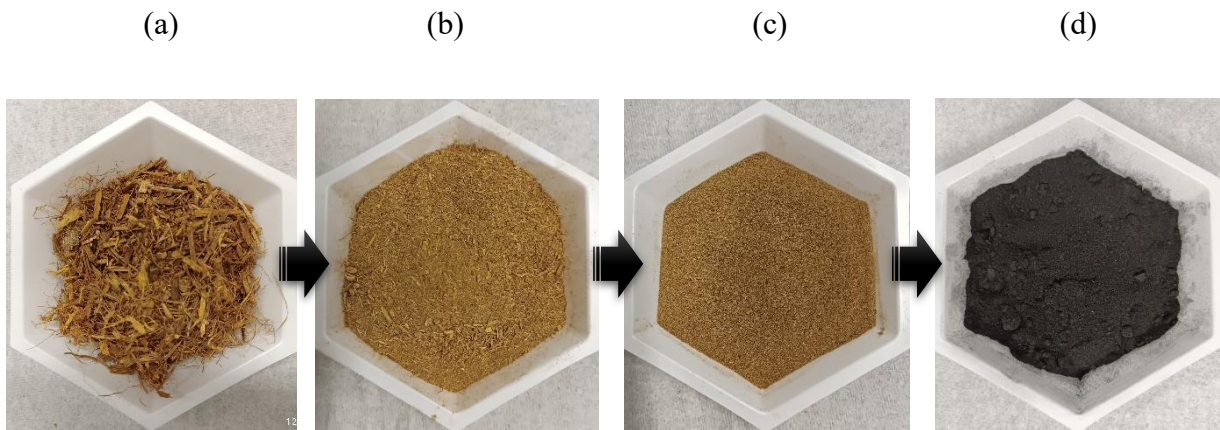
Preparación de muestras:

- **Secado:** La biomasa se secó a 105°C durante 12 horas para eliminar la humedad.
- **Trituración y tamizado:** La biomasa seca se trituró y tamizó para obtener un tamaño de partícula consistente entre 125 y 150 micrómetros.

En la figura 5 se observa el proceso de cambio por el cual migra la biomasa:

Figura 5

Transformación de la biomasa a biocarbón



a) Biomasa Rastrojo de maíz.

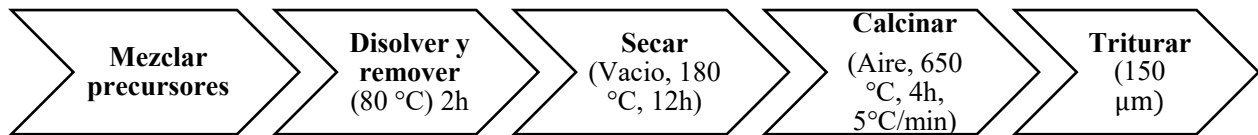
- b) Biomasa secada y triturada.
- c) Biomasa tamizada al tamaño de partícula deseado (150 μm).
- d) Bio-carbón producido (tamizado por segunda vez para conseguir el tamaño de partícula deseado).

6.3.2 Preparación del Catalizador:

Ca₂Fe₂O₅: composición base de nitrato de calcio tetrahidratado ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), nitrato de hierro (III) no deshidratado ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), y ácido cítrico en una relación molar específica ($\text{Fe} : \text{Ca} : \text{ácido cítrico} = 1 : 1 : 6$ for $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$). Las etapas del proceso se describen en la figura 6.

Figura 6

Preparación del catalizador



6.4 Eficiencia del catalizador:

Para evaluar la eficiencia y estabilidad del catalizador para la producción de hidrogeno, se realizó una prueba cíclica en condiciones controladas, con la función esencial de evaluar la

capacidad del catalizador para regenerarse y mantener su rendimiento a lo largo de múltiples ciclos de reacción.

Las pruebas cíclicas requieren de tres diferentes mezclas de gases:

1. Nitrógeno (N_2)
2. Gas de Síntesis (Syngas)
3. Nitrógeno y Dióxido de Carbono ($N_2 + CO_2$)

Cada ciclo consistió en una fase de reducción, en la cual se introduce el gas de reacción (Syngas) en el reactor, donde interactúa con el catalizador a alta temperatura y se mide la producción de hidrogeno y otros productos gaseosos

A continuación, se introduce el nitrógeno, un gas neutro que tiene la función de limpiar el sistema y seguidamente comienza una fase de oxidación, donde el sistema se expone al Dióxido de Carbono para evaluar su capacidad de regeneración para recuperar su capacidad inicial después de la reacción

Tomando en cuenta la realización de 10 ciclos, cada ciclo se organiza de la siguiente manera:

1. Nitrógeno (10 min)
2. Gas de síntesis (10 min de recolección de muestra)
3. Nitrógeno (10 min)
4. Nitrógeno y Dióxido de Carbono (10 min de recolección de muestra)

6.5 Condiciones de Operación para la producción de hidrogeno:

Temperatura:

Rangos de variación de la temperatura

4. 25°C a 650°C en intervalos de 200°C.
5. 25°C a 750°C en intervalos de 200°C.
6. 25°C a 850°C en intervalos de 200°C.

Tiempo de Reacción: Se llevó a cabo un análisis de la variación de temperatura, tomando muestras en intervalos de 200 °C hasta alcanzar la temperatura objetivo. Posteriormente, al llegar a la temperatura máxima establecida, se procedió a la toma de muestras en intervalos de 10 minutos

Tipo de Catalizador: $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$

Ejecución del Experimento:

- **Preparación del Reactor:**

- a) Pesar 4 gramos de biomasa y 0.4 gramos de catalizador.
- b) Mezclar la biomasa y el catalizador durante 10 minutos para asegurar una distribución uniforme.

- **Inicio del Flujo de Gas:**

Iniciar el flujo de nitrógeno (N_2) en el reactor.

- **Para el proceso de pirólisis:**

- a) Conectar la entrada de N_2 a la parte superior del reactor.

- b) Conectar la manguera de recogida de bioaceite a la parte inferior del reactor.
- c) Para el proceso de gasificación:
- d) Conectar una bomba de jeringa en la parte superior del reactor para suministrar vapor de agua (H₂O) a la temperatura deseada.

Para el tercer objetivo es necesario determinar la eficiencia de los productos obtenidos en el proceso Syngas usando análisis de cromatografía de gases (CG).

- **Preparación del Cromatógrafo de Gases (GC, Capillary and Packed Gas Chromatograph marca Shimadzu (Ref. GC-2014)):**

- a) Confirmar el flujo de gas (Argón) en el GC.
- b) Abrir la plataforma LabSolutions.
- c) Iniciar el método GC PFI.
- d) Aplicar el método de espera 18 con un caudal de 18 ml/min y PTCI: 0 mA.
- e) Aplicar el método inyección manual en modo split 2 con un caudal total de 18 ml/min y DTCI: 70 mA debido al uso de argón.
- f) Esperar a que el GC se estabilice, lo cual se indica con una línea recta en el monitor.

- **Inicio del Proceso de Reacción:**

- a) Una vez estabilizado el GC, comenzar el incremento de temperatura del reactor.

- b) Tomar nota del tiempo de subida de la burbuja de gas.
- c) Muestrear el gas producido en bolsas cada 10 minutos.
- **Monitoreo y Análisis:**
 - a) Inyectar las muestras de gas en el GC.
 - b) Monitorear y registrar la producción de hidrógeno (H_2) a lo largo del proceso.

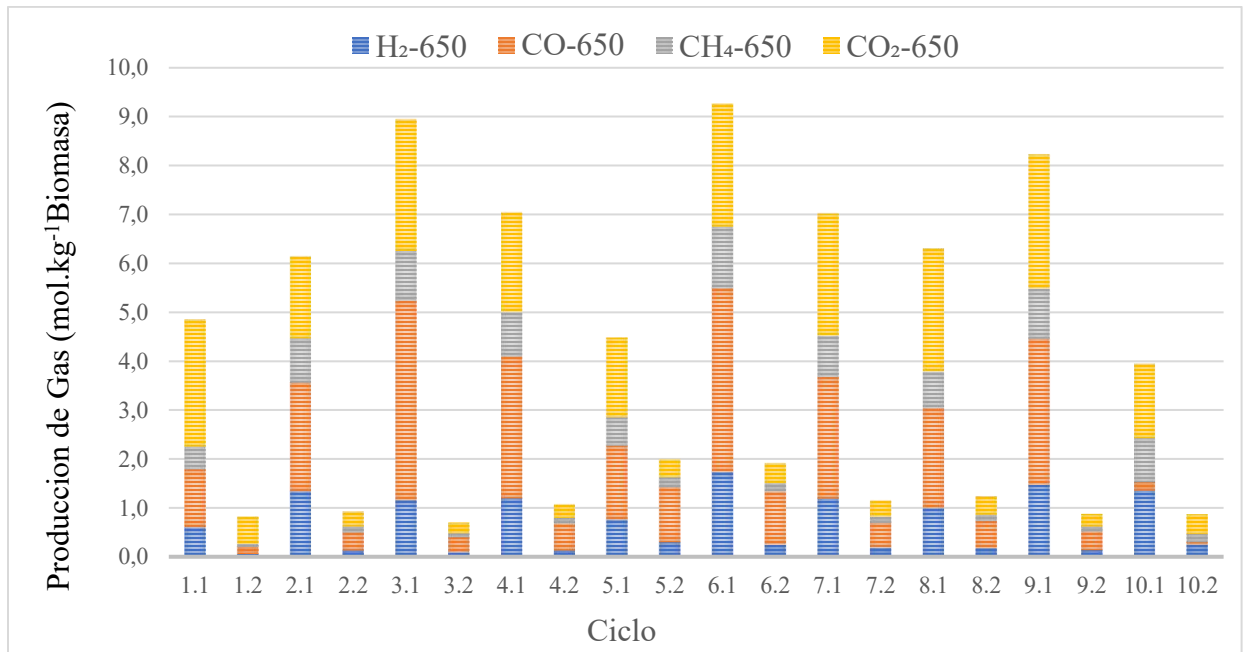
7. Análisis de Datos

7.1 Catalizador

En la Figura 7 se observa la variación cíclica del catalizador, lo que demuestra que es un proceso funcional, el primer dígito señala el ciclo y el segundo la iteración.

Figura 7

Producción de gas por ciclo



Donde X.n es el ciclo, expresamos la iteración como n = 1 y n = 2, siendo el conjunto de un solo ciclo, así:

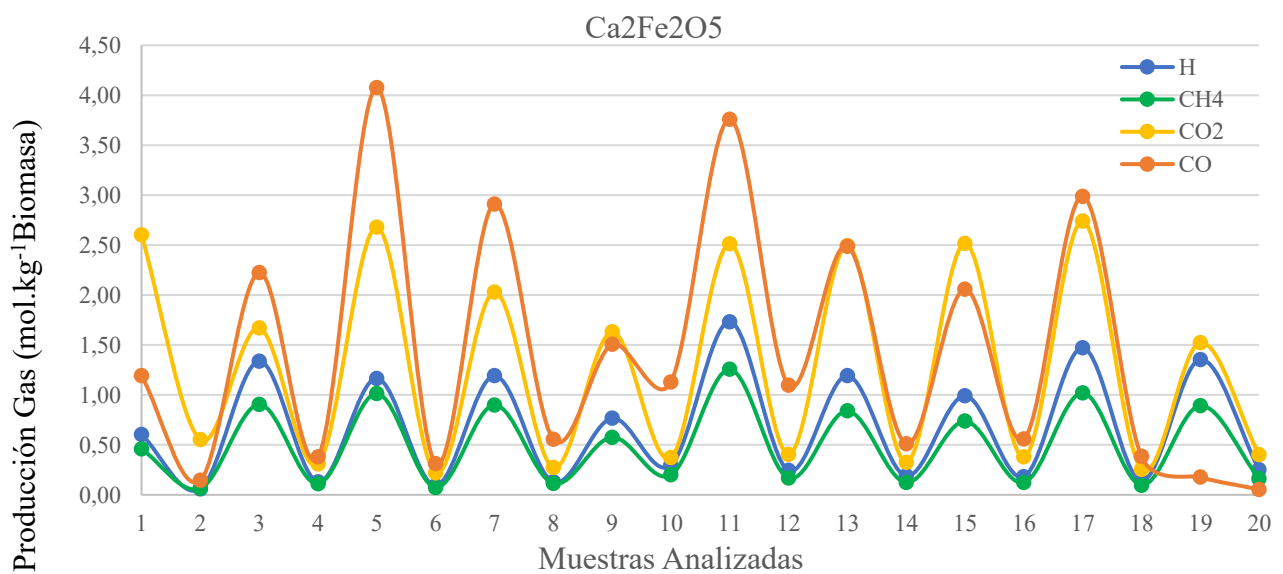
- X.1 El gas de síntesis compuesto principalmente por CO y H_2 , el cual busca ser el gas reductor, mostro una alta capacidad catalítica con una significativa producción de hidrogeno, la liberación efectiva del hidrogeno presente en el syngas y la conversión adicional de hidrogeno a través del CO .
- X.2 En las pruebas con $N_2 + CO_2$, el catalizador demostró una notable capacidad de oxidación, es decir regeneración del catalizador con CO_2 , lo que indica que el catalizador es capaz de operar efectivamente.

El catalizador $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ fue evaluado en un sistema cíclico para determinar su potencial en la producción de hidrógeno, destacándose como un material prometedor en este campo. Los resultados obtenidos reflejan su estabilidad, capacidad de regeneración y áreas clave para su optimización.

Durante las pruebas cíclicas, la producción de hidrógeno (H_2) mostró un comportamiento estable a lo largo de los 10 ciclos realizados como se observa en la figura 8. Este desempeño constante resalta la buena estabilidad catalítica del material bajo las condiciones de operación. Sin embargo, en términos relativos, la magnitud de producción de hidrógeno fue inferior a la de otros gases, como el monóxido de carbono (CO). Este resultado sugiere la necesidad de optimizar las condiciones de reacción o modificar la composición del catalizador para incrementar selectivamente la generación de hidrógeno.

Figura 8

Producción de gas en cada una de las muestras analizadas



La capacidad de regeneración del catalizador se confirmó durante las fases de oxidación con dióxido de carbono (CO₂), permitiendo recuperar en gran medida su actividad inicial. Esto es esencial para garantizar su reutilización en múltiples ciclos sin necesidad de reemplazos frecuentes.

A pesar de estas limitaciones, el catalizador Ca₂Fe₂O₅ tiene un desempeño prometedor y se perfila como una opción viable para procesos industriales enfocados en incrementar la producción de hidrógeno. Si bien los resultados obtenidos son alentadores, el diseño y la operación a gran escala requerirán ajustes adicionales para maximizar su rendimiento y eficiencia a largo plazo.

7.2 Pirolisis

Los resultados de la tabla 1 muestran las cantidades de mol/kg biomasa producida por pirolisis para cada uno de los gases resultantes en las condiciones evaluadas.

Tabla 1

Cantidad de mol/kg de biomasa producida por pirolisis para cada condición evaluada

Prueba	Temperatura	H₂	CO	CH₄	CO₂
No Catalizador	650	0,72	1,86	0,47	2,83
	750	1,00	0,05	0,60	1,22
	850	1,59	0,07	0,55	1,89
Ca₂Fe₂O₅	650	1,03	1,04	0,57	2,72
	750	1,66	1,22	0,66	2,21
	850	3,55	4,11	1,02	2,55

Este proceso de descomposición térmica ocurre en ausencia de oxígeno y genera productos en forma de gas, bio-aceite y carbón, tanto con catalizador como sin el mismo, la variación que se busca analizar en este proceso es la capacidad de producción de Hidrogeno en cada una de las condiciones tomadas.

Al evaluar el efecto del proceso térmico en cada una de las temperaturas deseadas se evidencio que esta es un factor crucial que influye en la distribución y composición de los productos resultantes, A continuación, se explica cómo afecta directamente a la producción de hidrogeno el uso de una mayor o menor temperatura:

Etapa a 650°C

Debido a que es una temperatura relativamente baja predominan los compuestos ligeros como el CO , CO_2 y CH_4 con baja producción de Hidrogeno, como podemos observar en la figura 9, así mismo debido a que hay una menor descomposición de la biomasa existe una alta producción de carbón.

Dando como resultado que a mayor cantidad de bio-aceite debido a que las bajas temperaturas promueven la formación de líquidos, esto sugiere un rendimiento entre 20% y 30% y una producción de biocarbón con un rendimiento aproximado entre 60% y 70%.

Muestra tomada del resultante de la prueba de pirolisis a 650°:

Figura 9

bioaceite y biocarbón resultante de pirolisis a 650°

**Etapa a 750°C**

A medida que la temperatura aumenta la presencia de los gases comienza a aumentar, así mismo la proporción de hidrogeno en la mezcla gaseosa debido a una mayor descomposición térmica de la biomasa, por lo tanto disminuyen los componentes líquidos de entre 10% y 20%, al igual que los componentes sólidos entre 40% y 50%, esto se observa claramente en la figura 10, el bio-aceite en esta fase también es más ligero porque contiene compuestos menos complejos.

Muestra tomada del resultante de la prueba de pirolisis a 750°:

Figura 10

bioaceite y biocarbón resultante de pirolisis a 750°

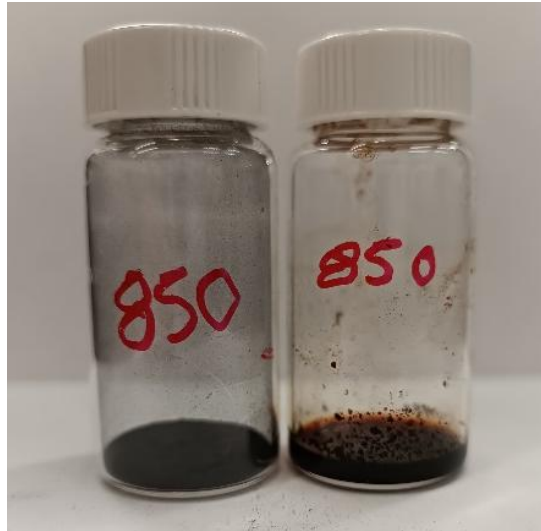
**Etapa a 850°C**

Cuando estamos en condición de temperatura de 850°C es cuando ocurre la máxima producción de gas, especialmente de hidrogeno debido a que las condiciones térmicas favorecen la ruptura de enlaces C-H en la biomasa y así mismo la formación de hidrocarburos más ligeros, haciendo que el monóxido de carbono (CO) también aumente y se observe una menor proporción de dióxido de carbono y metano (CH₄) en comparación con las temperaturas más bajas, así mismo mínimas cantidades de bio-aceite, en la figura 11 se observa una proporción de entre 5 a 10%, ya que la mayoría de compuestos orgánicos volátiles se descomponen completamente en gases y bio-carbón resultante de la descomposición de la biomasa es significativamente menor, de 20% a 30%, en un estado más puro y como resultado este contiene menos compuestos orgánicos residuales.

Muestra tomada del resultante de la prueba de pirolisis a 850°:

Figura 11

Bioaceite y biocarbón resultante de pirolisis a 850°

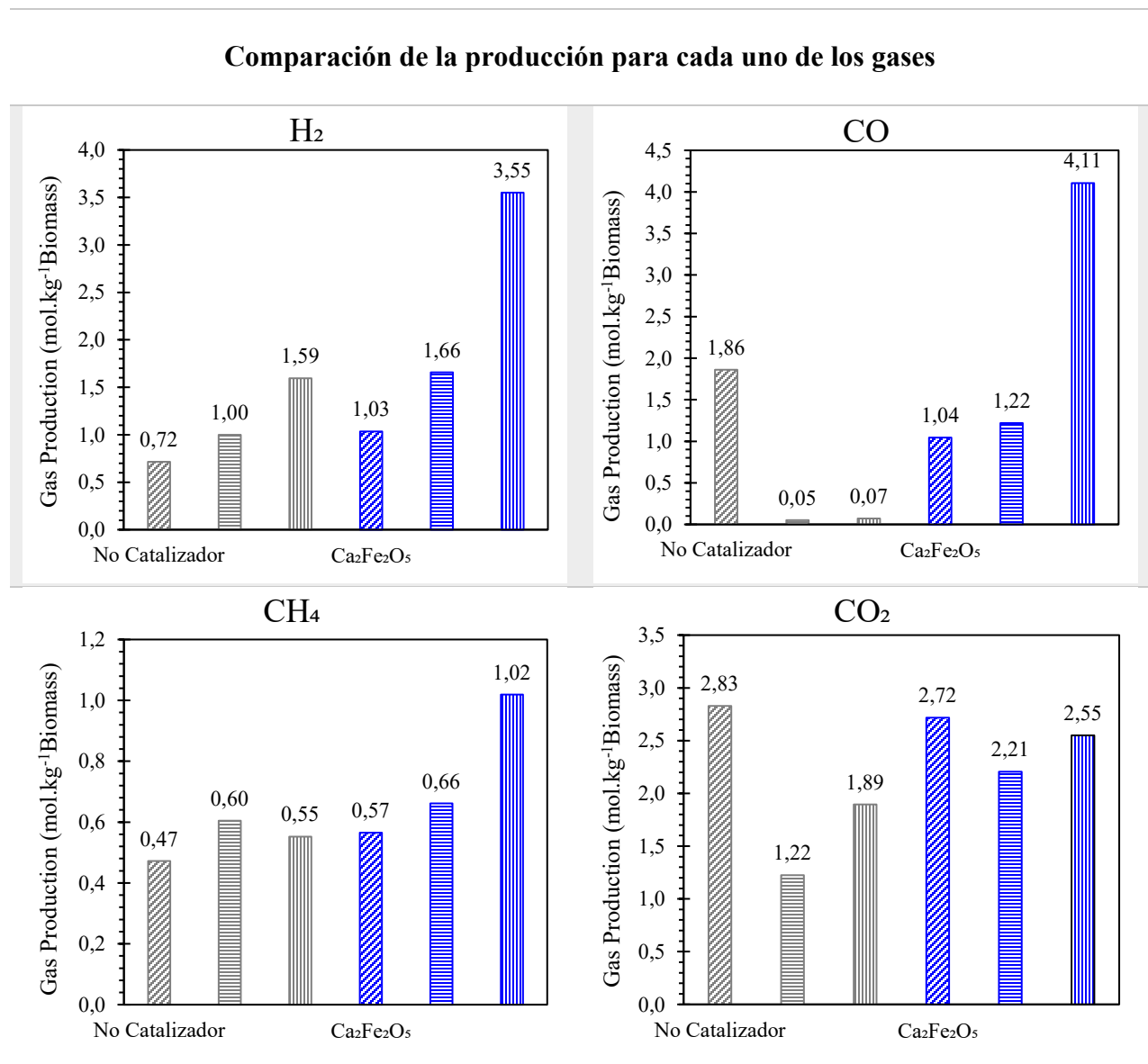


Evaluando el impacto del uso del catalizador, se tiene el siguiente conjunto de gráficos donde se analiza las temperaturas de 650°C, 750°C y 850°C, dividido entre las condiciones: con catalizador y sin catalizador $Ca_2Fe_2O_5$, demostrando como la presencia de un catalizador modifica la proporción de los gases producidos en función de las condiciones planteadas.

La figura 13 destaca el impacto positivo del catalizador en la producción de gases como H₂ y CO, que incrementan drásticamente, sugiriendo que Ca₂Fe₂O₅ promueve la descomposición de biomasa hacia gases de valor energético elevado.

Figura 13

Gases producidos durante la prueba de pirolisis, con y sin catalizador



A medida que aumenta progresivamente la temperatura, se observa a su vez un incremento tanto en el porcentaje molar como en la concentración de hidrogeno. A 650°C, se obtiene un porcentaje molar de 3,3% y una máxima concentración de 31,74 ml, resultando en una concentración final de 0,72 mol/kg de biomasa. Este valor alcanza su punto máximo a 850°C con un porcentaje molar de 9,3%, una concentración máxima de 77,71 ml y unan concentración final de 1,59 mol/kg de biomasa, sin el uso del catalizador.

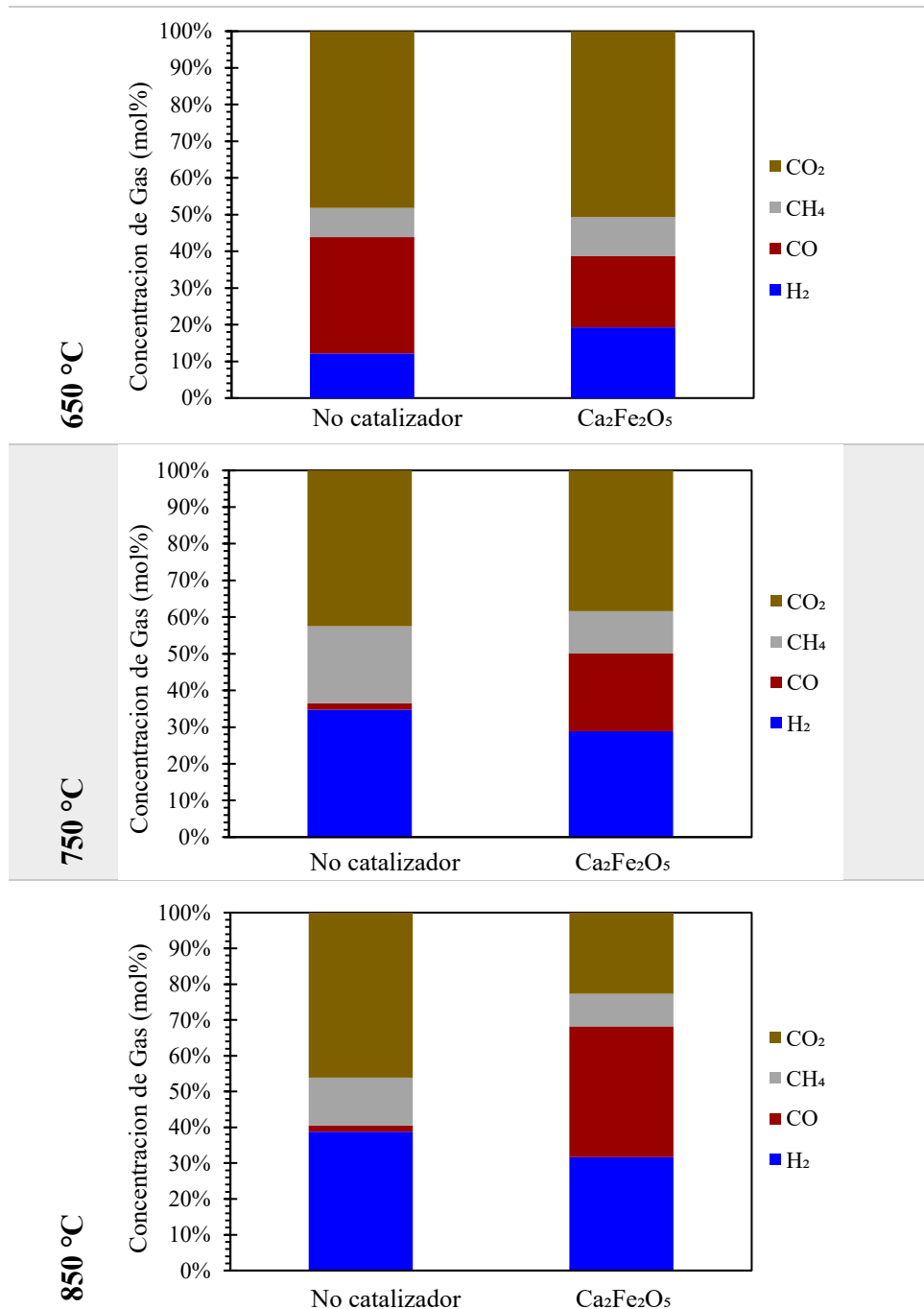
El análisis de producción de hidrogeno arroja que el uso del catalizador $Ca_2Fe_2O_5$ mejora significativamente en todas las temperaturas evaluadas, comenzando a 650°C, se logra un porcentaje molar de 4,9% y una concentración máxima de 51,69 ml, resultando en una concentración final de 1,03 mol/kg de biomasa. A 750°C, estos valores aumentan a un porcentaje molar de 6,2%, una concentración máxima de 63,18 ml y una concentración final de 1,66 mol/kg de biomasa. Finalmente, la mejora más notable se observa al llegar a la temperatura de 850°C, donde el porcentaje molar es de 24,7%, con una concentración máxima de 148,25 ml y una concentración final de 3,55 mol/ kg de biomasa.

Este incremento se debe a la capacidad del catalizador para facilitar la ruptura de enlaces C – H y C – C en los hidrocarburos presentes en la biomasa, lo que promueve las reacciones de descomposición y reformado que aumentan la generación de hidrogeno y monóxido de carbono.

En la figura 14 al usar el catalizador ($Ca_2Fe_2O_5$), las concentraciones de H_2 y CO aumentan significativamente en comparación con las condiciones sin catalizador, especialmente a temperaturas más alta

Figura 14

Comparación de las concentraciones de gas evaluadas durante la pirolisis.



7.3 Gasificación:

Los resultados de la tabla 2 muestran las cantidades de mol/kg biomasa producida por gasificación para cada uno de los gases resultantes en las condiciones evaluadas

Tabla 2

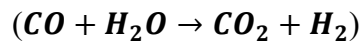
Cantidad de mol/kg de biomasa producida por gasificación para cada condición evaluada

Muestra	Temperatura	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
No Catalizador	650	3,30	0,78	0,79	4,94
	750	8,46	1,87	0,66	6,85
	850	14,57	3,23	1,78	11,28
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	650	4,65	0,67	0,91	6,35
	750	13,85	2,30	1,84	12,97
	850	19,24	1,62	1,17	12,70

Durante la realización de la prueba se empleó un flujo constante de nitrógeno a 80 ml/min y un flujo de vapor de agua a 0.2 ml/min, lo cual resultó en una clara correlación entre el incremento de la temperatura y la eficiencia en la producción de hidrógeno, como está presente en la Tabla 2, a una temperatura de 650°C, se observó la menor producción de hidrógeno, lo que sugiere que la energía térmica no es suficiente para promover de manera efectiva las reacciones de descomposición y reformado necesarias para la liberación del hidrógeno.

Sin embargo, al ir incrementando la temperatura se evidencia una mayor eficiencia con altos niveles de producción, lo cual indica que las altas temperaturas favorecen la descomposición completa de los compuestos, lo que a su vez tiene un impacto directo en la velocidad de producción de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), como se puede observar en la figura 15.

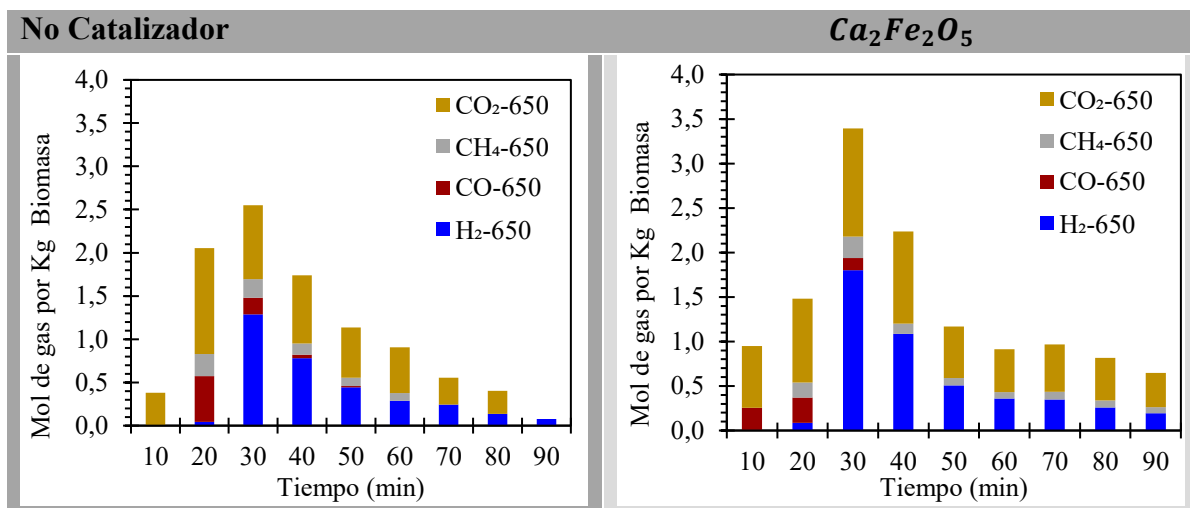
Al interactuar el vapor de agua (H_2O) con el monóxido de carbono (CO) y los demás hidrocarburos presentes, promueve su conversión en dióxido de carbono (CO_2) y una mayor cantidad de hidrogeno, comparando estos resultados con los vistos en la reacción con pirolisis se observa una mejora significativa en la optimización del rendimiento de producción, como se ilustra en la siguiente reacción:

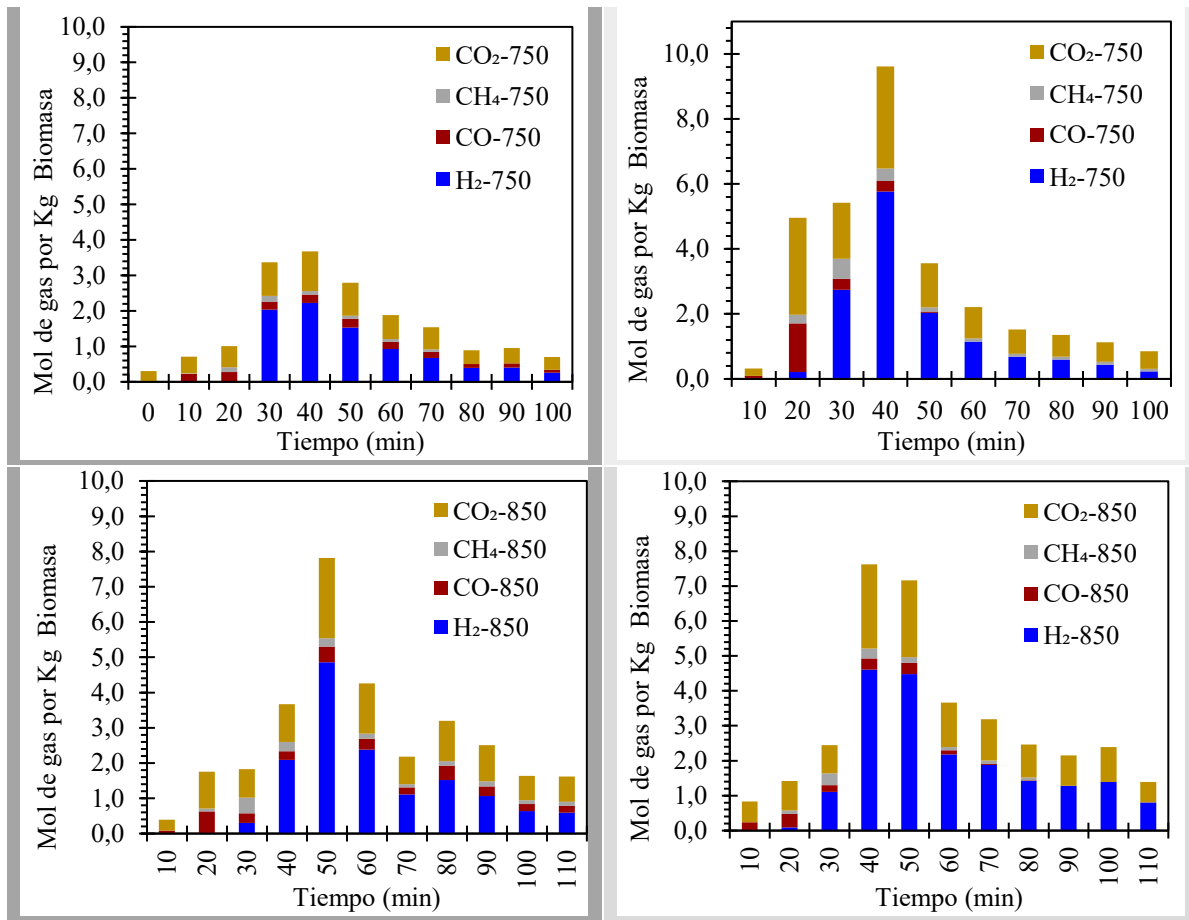


Proceso que se ve evidenciado en la siguiente figura donde se observa que el catalizador mejora drásticamente la producción de H_2 y CO , particularmente a $850^\circ C$, donde estas concentraciones dominan:

Figura 15

Comparación de la producción de gases: con y sin catalizador en gasificación



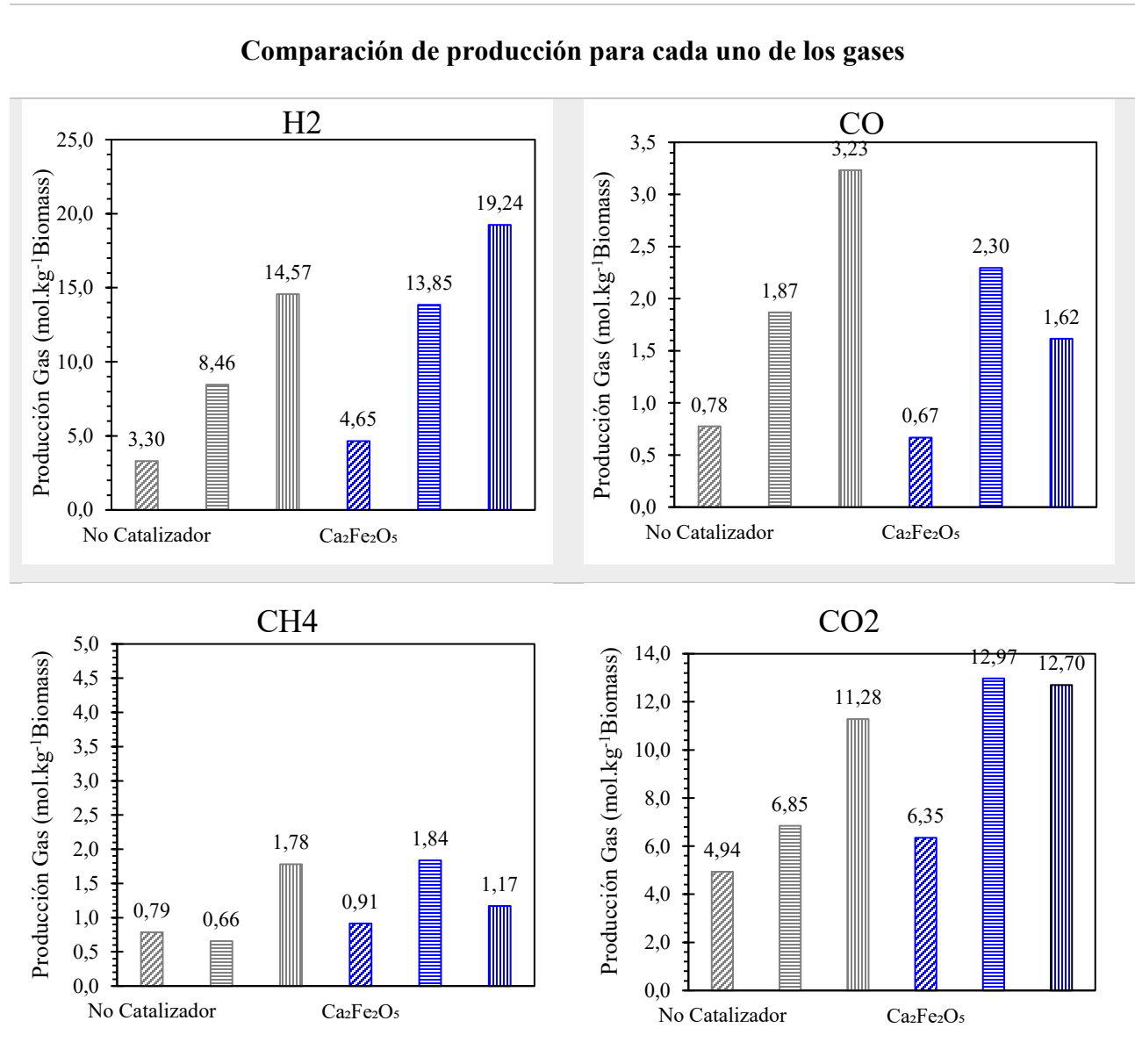


A medida que aumenta la temperatura debido a la gasificación, se observa un incremento sostenido en las concentraciones de H₂ y CO cuando se utiliza el catalizador, alcanzando hasta el 70% del total de gases producidos a 850°C. En contraste, los gases CH₄ y CO₂ muestran variaciones menos significativas, manteniéndose alrededor del 30% y 40% en las diferentes condiciones.

La presencia del catalizador no solo reduce la energía necesaria para la activación de las reacciones sino además aumenta la selectividad hacia la producción de hidrogeno como se observa en la figura 16, lo que aumenta la producción de gas al mismo tiempo que disminuye la producción de bio-aceite y bio-carbón, esto evidenciado en la figura 17.

Figura 16

Gases producidos durante la prueba de Gasificación: con y sin catalizador

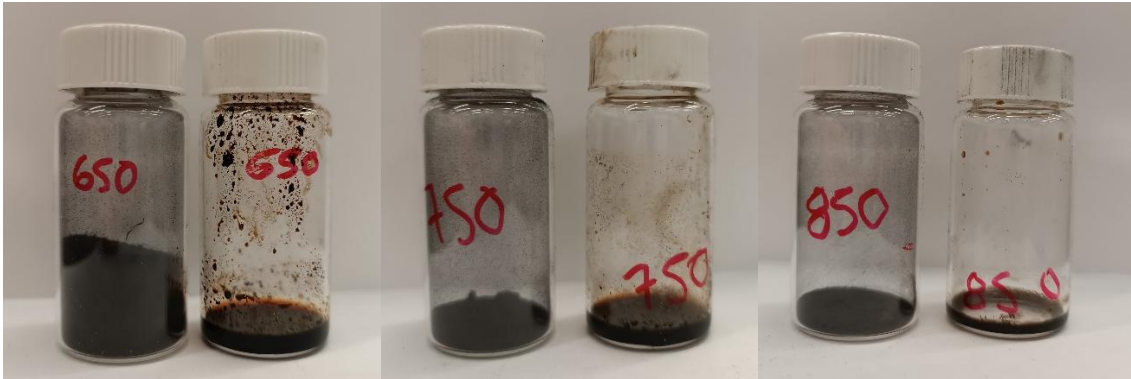


Entonces al unir el catalizador, el cual asegura que ocurra una reacción eficiente, y la inyección de vapor de agua, que de igual manera impulsa la reacción, su combinación crea un

entorno óptimo para la producción de hidrogeno y así mismo el aumento de porcentaje en producción gaseosa nos genera una reducción en otros compuestos sólidos y líquidos, (figura 17).

Figura 17

Bioproductos sólidos y líquidos obtenidos en el proceso de gasificación de biomasa de maíz.

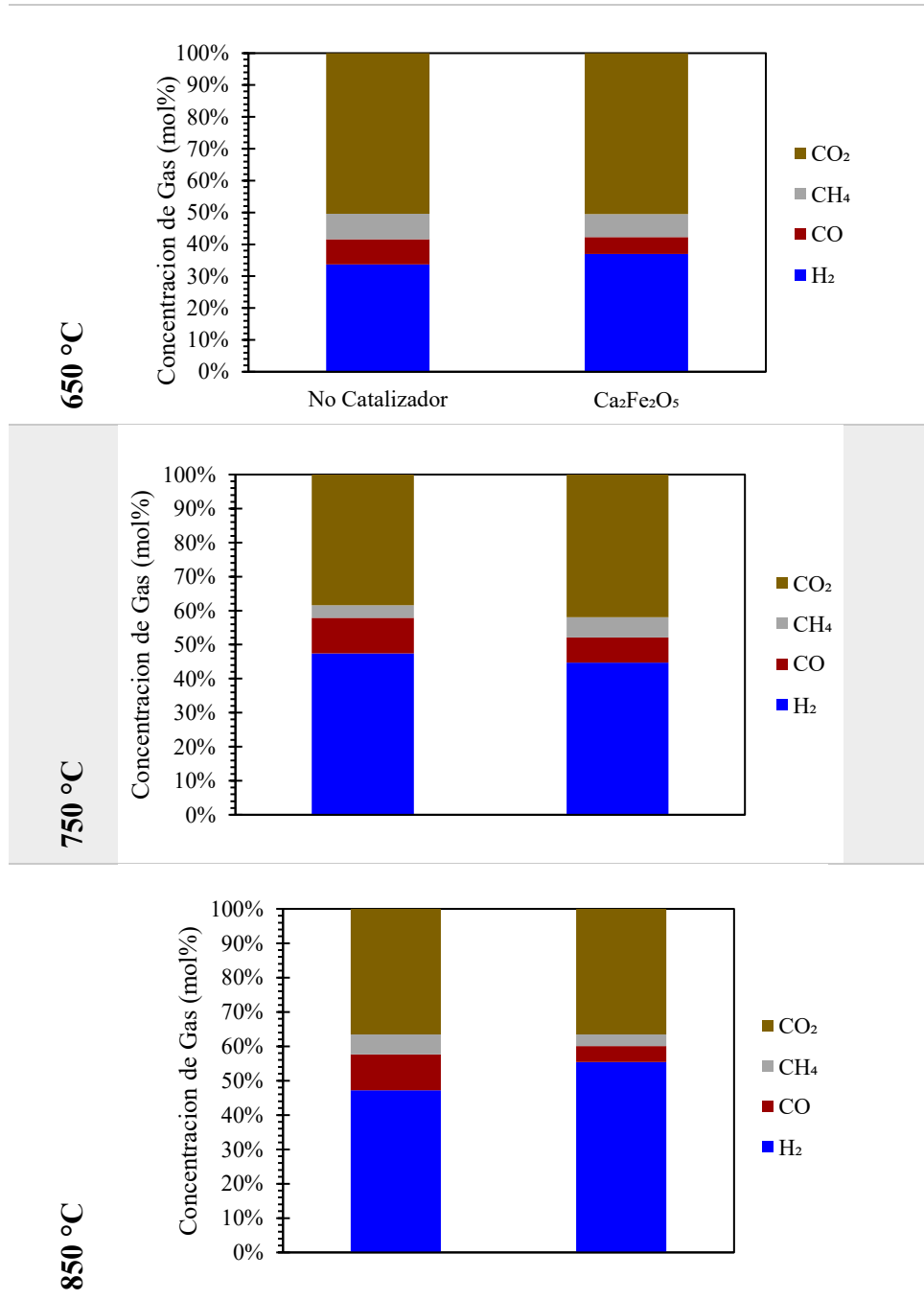


Durante la gasificación la concentración de los gases demostró que a medida que aumenta la temperatura y se implementa el uso del catalizador, el resultado es la optimización de la producción de H_2 y CO , que alcanzaron concentraciones máximas del 67% del total de gases generados a $850^\circ C$.

Por otro lado, las concentraciones de CH_4 y CO_2 disminuyeron progresivamente, pasando de un rango de 45% y 55% sin catalizador a aproximadamente 33% y 38% con catalizador a la temperatura más alta, como se visualiza en la figura 18.

Figura 18

Comparación de las concentraciones de gas evaluadas durante la gasificación.



8. Pirolisis y Gasificación

En la pirolisis, la biomasa se descompone térmicamente en ausencia de oxígeno, generando una menor cantidad de gases. Bajo estas condiciones, la producción de hidrógeno es bastante baja, oscilando desde aproximadamente 0.72 mol/kg a 650°C hasta llegar a 3.55 mol/kg a 850°C cuando se utiliza el catalizador ($Ca_2Fe_2O_5$). Este proceso favorece la formación de biochar y bioaceite, siendo la fracción gaseosa y en particular el H_2 es menos predominante (Tabla 3).

Tabla 3

Porcentaje de aumento de la producción de hidrogeno en función del catalizador durante la pirolisis

	Prueba	Temperatura	H_2	% de aumento
Pirolisis	No Catalizador	850	1,59	123
	$Ca_2Fe_2O_5$	850	3,55	

Por otro lado, en la gasificación se añade un agente gasificante (como vapor o aire), lo que permite reacciones de reformado y la participación de mecanismos como el cambio de gas de agua (water–gas shift). Esta dinámica favorece considerablemente la formación de hidrógeno. En este caso, el H_2 se produce en un intervalo mucho más amplio y elevado: desde 3.30 mol/kg a 650°C hasta alcanzar 19.24 mol/kg a 850°C (con catalizador), como se observa en la Tabla 4. Además, incluso sin catalizador se observan valores significativamente mayores que en la pirolisis (Tabla 3).

Tabla 4

Porcentaje de aumento de la producción de hidrogeno en función del catalizador durante la gasificación.

	Prueba	Temperatura	H₂	% de aumento
Gasificación	No Catalizador	850	14,6	32
	Ca₂Fe₂O₅	850	19,2	

El proceso de gasificación es claramente superior para la generación de hidrógeno, ya que su intervalo de producción se encuentra entre aproximadamente 3.30 y 19.24 mol/kg, en comparación con el rango de 0.72 a 3.55 mol/kg mostrado en la pirolisis. Se consigue aumentar en 442% de la mayor producción obtenida en pirolisis con catalizador a la mayor producción obtenida con gasificación, especialmente en H₂, haciéndolo el proceso preferido para aplicaciones que requieran altos rendimientos de hidrógeno. (Tabla 5).

Tabla 5

Porcentaje de aumento de la producción de hidrogeno en función de la metodología utilizada.

	Prueba	Temperatura	H₂	% de aumento
Pirolisis	Ca₂Fe₂O₅	850	3,55	442
Gasificación	Ca₂Fe₂O₅	850	19,2	

9. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten confirmar que la gasificación con bucle químico y la pirolisis son procesos capaces de convertir biomasa residual de maíz en hidrógeno y otros productos gaseosos. Sin embargo, se encontró que la gasificación con el catalizador $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ mejora significativamente la producción de H_2 , aumentando su rendimiento y reduciendo la formación de compuestos no deseados.

A través del análisis de las variables del proceso, se determinó que una mayor temperatura favorece la producción de hidrógeno. En ausencia de catalizador, la cantidad de H_2 aumentó en un 341.5% (de 3.30 a 14.57 mol/kg) aumentando únicamente la temperatura, mientras que con $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ la producción alcanzó los 19.24 mol/kg, representando un incremento del 313.8% respecto a los 4.65 mol/kg obtenidos a 650°C con catalizador, lo que quiere decir que en la temperatura de 850°C tenemos una diferencia significativa en producción de hidrogeno, así mismo la diferencia es del 32% con y sin catalizador (de 14.57 a 19.24 mol/kg).

La producción de CO también se vio afectada por la temperatura y el uso del catalizador. Sin catalizador, la concentración de CO aumentó en un 314% de 0.78 a 3.23 mol/kg al pasar de 650°C a 850°C. Sin embargo, con $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, la producción de CO disminuyó en un 30% respecto a la condición sin catalizador a la misma temperatura, lo que indica un mejor aprovechamiento del carbono para la producción de H_2 .

Además, se identificó que la presencia de bioaceite y biocarbón es inversamente proporcional a la producción de H₂, es decir, cuanto mayor es la producción de hidrógeno, menor es la cantidad de bioaceite y biocarbón generados. Esto sugiere que las condiciones que favorecen la producción de H₂ (altas temperaturas y el uso de catalizador) promueven una conversión más completa de la biomasa, reduciendo la formación de productos secundarios.

En conclusión, la gasificación con Ca₂Fe₂O₅ a 850°C se presenta como la mejor opción para la conversión de biomasa de maíz en hidrógeno, con la mayor producción de H₂ y una reducción en la generación de subproductos no deseados. Esto demuestra el potencial del uso de catalizadores para mejorar la eficiencia de los procesos termoquímicos y contribuir al desarrollo de tecnologías más sostenibles para la producción de hidrógeno a partir de biomasa residual.

Publicaciones derivadas de esta tesis

Durante el desarrollo de esta investigación se publicó el siguiente artículo:

Dawa, T., Silva Martinez, M. P., & Sajjadi, B. (2025). *Enhanced production of hydrogen through modified brownmillerite Ca₂Fe_{2-x}M_xO₅ (M: Co, Cu, Ni) for chemical looping gasification*. *Fuel*, 390, 134490. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134490>

10. Recomendaciones

Se recomienda la optimización de los procesos y la exploración de escalamiento industrial para evaluar su viabilidad comercial.

Tomar en cuenta la posibilidad de probar otros catalizadores y el uso de un gas diferente al nitrógeno, como, por ejemplo, el Gas natural y Gases residuales de refinería.

Referencias bibliográficas

- Basu, Prabir. 2018. «Pyrolysis». En Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, 155-87. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00005-4>.
- EIA. 2020. «Annual Energy Outlook 2020 with projections to 2050». AEO2020). EIA. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2020%20full%20report.pdf>.
- Grob, Robert L., y Eugene F. Barry. 2004. Modern Practice of Gas Chromatography. John Wiley & Sons.
- Jimenez Herrero, L. M. (2018). Desarrollo sostenible: transición hacia la coevolución global. Difusora Larousse - Ediciones Pirámide. <https://elibro.net/es/lc/uis/titulos/123060>
- Karlen, Douglas L., Rattan Lal, Ronald F. Follett, John M. Kimble, Jerry L. Hatfield, John M. Miranowski, Cynthia A. Cambardella, Andrew Manale, Robert P. Anex, y Charles W. Rice. 2009. «Crop Residues: The Rest of the Story». Environmental Science & Technology 43 (21): 8011-15. <https://doi.org/10.1021/es9011004>.
- Liu, Guicai, Yanfen Liao, Yuting Wu, y Xiaoqian Ma. 2019. «Enhancement of Ca₂Fe₂O₅ Oxygen Carrier through Mg/Al/Zn Oxide Support for Biomass Chemical Looping Gasification». Energy Conversion and Management 195 (septiembre):262-73. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.087>.
- McNair, Harold M., James M. Miller, y Nicholas H. Snow. 2019. Basic Gas Chromatography. John Wiley & Sons.

Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>

Pérez Sánchez, J. T. (2010). ¿La producción de hidrogeno a partir de biomasa vía gasificación es una alternativa ambientalmente viable para reemplazar la energía de los combustibles fósiles? Universidad Industrial de Santander].

Ren, Jie, Jing-Pei Cao, Xiao-Yan Zhao, Fei-Long Yang, y Xian-Yong Wei. 2019. «Recent Advances in Syngas Production from Biomass Catalytic Gasification: A Critical Review on Reactors, Catalysts, Catalytic Mechanisms and Mathematical Models». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 116 (diciembre):109426. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109426>.

Situmorang, Yohanes Andre, Zhongkai Zhao, Akihiro Yoshida, Abuliti Abudula, y Guoqing Guan. 2020a. «Small-Scale Biomass Gasification Systems for Power Generation (<200 kW Class): A Review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 117 (enero):109486. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>.

Sun, Z., Chen, S., Hu, J., Chen, A., Rony, A. H., Russell, C. K., Xiang, W., Fan, M., Darby Dyar, M., & Dklute, E. C. (2018). Ca₂Fe₂O₅: A promising oxygen carrier for CO/CH₄ conversion and almost-pure H₂ production with inherent CO₂ capture over a two-step chemical looping hydrogen generation process. *Applied Energy*, 211, 431-442. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.005>

Sun, Zhao, Shiyi Chen, Christopher K. Russell, Jun Hu, Asif H. Rony, Gang Tan, Aimin Chen, et al. 2018a. «Improvement of H₂-Rich Gas Production with Tar Abatement from Pine Wood

Conversion over Bi-Functional $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ Catalyst: Investigation of Inner-Looping Redox Reaction and Promoting Mechanisms». *Applied Energy* 212 (febrero):931-43.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.087>.