Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Diseño e implementación de un sistema integrado de producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos mediante fermentación oscura acoplada a celda de electrólisis microbiana (MEC) en la localidad de san Cristóbal, Llata – Huánuco

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Ulises Angel REYES NEIRE

ASESOR

Dra. Juana SANDIVAR ROSAS

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Reyes, U. (2026). *Diseño e implementación de un sistema integrado de producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos mediante fermentación oscura acoplada a celda de electrólisis microbiana (MEC) en la localidad de san Cristóbal, Llata – Huánuco*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Ulises Angel Reyes Neire
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72791917
URL de ORCID	-
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Juana Sandivar Rosas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08667298
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8494-2940
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Víctor Manuel Fernández Guzman
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06690674
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Eliana Jara Morante
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	23860280
Datos de investigación	
Línea de investigación	Biotecnología Ambiental y Energías Renovables
Grupo de investigación	Valorización de residuos agroindustriales y bioprocesos y Energías Renovables
Agencia de financiamiento	Ninguno

Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Institución Víctor. E. Vivar País: Peru Departamento: Huánuco Provincia: Huamalíes Distrito: Llata Latitud: -9.4167° Longitud: -76.7833°
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Enero 2026 – junio 2026
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Química Orgánica http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.04.01 Biotecnología Industrial http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.09.01

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "VI Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2026-I", bajo la Presidencia del **Dr. Víctor Manuel Fernández Guzmán;** la **Dra. Eliana Jara Morante (Miembro)** y la **Dra. Juana Sandivar Rosas (Asesora);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **"Diseño e implementación de un sistema integrado de producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos mediante fermentación oscura acoplada a celda de electrólisis microbiana (MEC) en la localidad de san Cristóbal, Llata – Huánuco",** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborada por el bachiller en Ingeniería Química: **REYES NEIRE, ULISES ANGEL;** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUÍMICO,** acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECISIETE 17

(LETRAS) (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 20 de junio del 2026

Dr. VÍCTOR MANUEL FERNÁNDEZ GUZMÁN
Presidente

Dra. ELIANA JARA MORANTE
Miembro

Dra. JUANA SANDIVAR ROSAS
Asesora

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS • DIRECCIÓN ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA • Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Juana Sandivar Rosas** en mi condición de asesora con el Dictamen N°000008-2026-EPIQ-FQIQ/UNMSM de la Tesis cuyo título es: **Diseño e implementación de un sistema integrado de producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos mediante fermentación oscura acoplada a celda de electrólisis microbiana (MEC) en la localidad de san Cristóbal, Llata – Huánuco,** presentado por el bachiller: **REYES NEIRE, ULISES ANGEL,** para optar el título Profesional de Ingeniero Químico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 11% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título Profesional de Ingeniero Químico.

Lima, 3 de julio del 2026

Firma del Asesora _____

Nombres y Apellidos de la asesora Juana Sandivar Rosas

DNI: 8667298

DEDICATORIA

Dedico la presente investigación, a mis padres, quienes con su esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional me brindaron la fortaleza necesaria para continuar mi formación profesional. Gracias por su confianza, comprensión y motivación constante durante cada etapa de mi vida académica.

Asimismo, dedico este trabajo a los docentes de mi universidad, quienes compartieron sus conocimientos, experiencias y enseñanzas a lo largo de mi formación universitaria. Su orientación académica y compromiso con la educación contribuyeron significativamente al desarrollo de esta investigación y a mi crecimiento como futuro profesional.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar satisfactoriamente esta importante etapa de mi formación profesional. Gracias por guiarme en cada momento difícil y permitirme alcanzar una de mis metas más importantes.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi asesora, Dra. Juana Sandívar Rosas, por su valiosa orientación, apoyo constante y dedicación durante el desarrollo de la presente investigación. Sus conocimientos, recomendaciones y compromiso académico fueron fundamentales para la realización y culminación de este trabajo de tesis.

INDICE GENERAL

RESUMEN ……12

INTRODUCCION 13

CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 15

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 15

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 16

1.2.1. PROBLEMA GENERAL 16

1.2.2. PROBLEMAS ESPECIFICOS 16

1.3. OBJETIVOS 17

1.3.1. OBJETIVO GENERAL 17

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

1.4. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN 18

1.5. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN 19

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACION 21

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES 23

2.1. ANTECEDENTES NACIONALES 23

2.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES 25

3.3. MARCO TEORICO 27

3.3.1. Residuos sólidos orgánicos 27

3.3.2. Fundamento bioquímico 28

3.3.3. Celda de electrólisis microbiana (MEC) 28

3.3.4. Integración fermentación oscura – MEC 29

3.3.5. RESIDUOS ORGÁNICOS: CÁSCARA DE PAPA Y RAQUIS DE MAÍZ COMO SUSTRATOS PARA PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO 30

3.3.6. Cinética del proceso de producción de biohidrógeno 34

3.3.7. Producción de biohidrógeno 35

3.3.8. Ventajas del biohidrógeno 37

3.3.9. Cálculos para la evaluación del proceso de producción de biohidrógeno 38

3.3.10. Características de la materia prima 44

3.3.11. Demanda química de oxígeno (DQO) de los residuos orgánicos (cascara de papa y raquis de maíz) 47

3.3.12. Normativa ambiental y gestión de residuos orgánicos 48

3.3.13. Valores permisibles de DQO según normativa peruana 50

CAPITULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES 52

3.1. HIPÓTESIS PRINCIPAL 52

3.2. HIPÓTESIS ESPECIFICAS 52

3.3. VARIABLES DE RESPUESTA 52

3.3.1. Variables independientes (VI) 52

3.3.2. Variables dependientes (VD) 53

3.3.3. Variables de control (VC) 54

CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS 55

4.1. LUGAR Y TIEMPO 55

4.2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL EXPERIMENTAL 56

4.2.1. Origen domiciliario (residencial) 56

4.2.2. Origen comercial 56
4.2.3. Origen agropecuario 56
4.2.4. Cantidad de RSO (toneladas por mes) 56
4.3. DISEÑO DE INVESTIGACION 57
4.4. ESQUEMA METODOLOGICO 57
4.5. DESARROLLO EXPERIMENTAL 57
4.5.1. Recolección y preparación de muestras 58
4.5.2. Caracterización fisicoquímica del sustrato 58
4.5.3. Pretratamiento del sustrato 59
4.5.4. Preparación del inóculo 59
4.5.5. Proceso de fermentación oscura 60
4.5.6. Operación de la celda de electrólisis microbiana (MEC) 60
4.5.7. Determinación del H_2 61
4.5.8. Determinación de la remoción de DQO 62
4.5.9. Diseño experimental y análisis estadístico 63
4.6. DISEÑO ESTADISTICO Y EXPERIMENTAL 64
4.6.1. Factores y niveles 64
4.6.2. Matriz del diseño factorial 64
4.6.3. Análisis de datos 65
CAPITULO V. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS 66
CAPITULO VI. CONCLUSIONES 72
CAPITULO VII. RECOMENDACIONES 74
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 75

ANEXOS 83

ANEXO 1: CÁLCULOS RESPECTIVOS PARA EL PROCESO DE FERMENTACIÓN OSCURA 83

1. Cálculo de moles de glucosa equivalente 83
2. Conversión del volumen de H_2 a moles 84
3. Cálculo del rendimiento de biohidrógeno 85
4. Comparación con rendimiento teórico 85
5. Cálculo de remoción de DQO 86
6. Productividad volumétrica 86

ANEXO 2: CÁLCULOS RESPECTIVOS PARA EL PROCESO DE MEC 87

1. Conversión del volumen de H_2 a moles 87
2. Balance químico de la MEC 88
3. Cálculo de moles de acetato consumido 88
4. Cálculo del rendimiento de la MEC 89
5. Cálculo de remoción de DQO en la MEC 89
6. Productividad volumétrica en la MEC 90
7. Producción total del sistema integrado FO + MEC (Para el sustrato Cascara de papa a 0.8 v) 90

ANEXO 4: CALCULOS PARA EL SUSTRATO RAQUIZ DE MAIZ A UN VOLTAJE DE 0.8V 91

Datos experimentales para la fo 91

Datos experimentales para la MEC 91

ANEXO 5: ANALISIS PARA LA OBTENCION DE MUESTRAS E PRODUCCION DE BIODROGENO 95

ANEXO 6: CALCULOS DEL ANALISIS ESTADISTICO ANOVA FACTORIAL 22 101

ANEXO 8: DIAGRAMA DEL PROCESO INTEGRADO JUNTO A LAS CONDICIONES Y REACCIONES QUIMICAS 103

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques del proceso ..... …….**30**

figura 2. Mapa de localización de san cristóbal, distrito de llata, provincia de huamalíes, región huánuco – perú……..**…..55**

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química proximal de cáscara de papa y raquis de maíz (base seca)**31**

tabla 2. Relación carbono/nitrógeno (c/n) **32**

tabla 3. Tabla de los valores permisibles de dqo según normativa peruana..... **50**

tabla 4. Tabla de los valores aproximados de residuos y lodos orgánicos **51**

tabla 5. Resumen de las variables independientes y rangos operativos..... **53**

tabla 6. Diseño factorial 2×2..... **65**

tabla 7. Caracterización de la cascara de papa..... **66**

tabla 8. Caracterización del raquis de maíz **67**

tabla 9. Anova factorial 2x2 ..... **68**

tabla 10. Valores de los datos recolectados luego de la experimentación **83**

tabla 11. Valores para la ecuación universal de los gases ideales **84**

tabla 12. Resultados de la primera parte (fermentacion oscura)..... **86**

tabla 13. Valores de los datos recolectados luego de la experimentación **87**

tabla 14. Valores para la ecuación universal de los gases ideales **88**

tabla 15. Resultados de la primera parte (fermentacion oscura)..... **90**

tabla 16. Valores experimentales para el raquiz de maíz (fo) **91**

tabla 17. Valores experimentales para el raquiz de maíz (mec) **92**

tabla 18. Resumen de los cálculos para el sustrato raquis de maíz (0.8 v)..... **92**

tabla 19. La fo + mec para para la cascara de papa y el raquis de maíz a (0.8 v)..... **93**

tabla 20. La fo + mec para para cascara de papa y el raquis de maíz a (0.6 v)..... **94**

tabla 21. Comparativo de ambos sustratos en distintos voltajes (0.6 v – 0.8 v)..... **95**

tabla 22. Datos experimentales de los sustratos vs voltajes **101**

tabla 23. Datos experimentales de las 3 réplicas por cada sustrato **101**

tabla 24. Anova factorial 2x2 desarrollado..... **101**

INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACION 1. (1a) muestras de los sustratos recolectados de los lugar determinado, posterior su secado, (1b) se procede a su triturado de 1mm a 5mm aproximadamente. **……..95**

ILUSTRACION 2.(2a) preparación e homogenización de las muestras a 15g/l para ingresarlo en la fermentación, (2b) medidor multiparamétrico de doble entrada de la marca hach ldo, con código hq440d multi, que nos ayuda para tener controlados los parámetros de control, (2c) control de la mezcla para su posterior medida de volumen de hidrogeno.**.. ……96**

ILUSTRACION 3. (3a) colegio emblemático de la localidad de huamalíes, llata; (3b) laboratorio de química del colegio, lugar donde se realizó los experimentos. **……97**

ILUSTRACION 4. (4a) centro de tratamiento de residuos sólidos walarmarca, (4b) ubicación de centro de recolección de la materia prima, (4c) división de secciones para cada tipo de residuo orgánico e inorgánico. **……...98**

ILUSTRACION *5.* (5a) sección de recolección y compostaje de residuos orgánicos, (5b) área de habilitación de lotes por degradación en walamarca. **……...99**

ILUSTRACION 6. (6a) invernadero de plantas hortalizas, frutas, etc. Usando el bioabono tratado en la planta, (6b) vista interior del invernadero en walamarca. **……99**

ILUSTRACION 7. (7a) botadero de basura, residuos orgánicos e inorgánicos, (7b) noticia actual 04/05/26, sobre la contaminación por el inadecuado tratamiento de residuos en el botadero de walamarca

……10

0

RESUMEN

La presente investigación evaluó un sistema integrado de producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos mediante fermentación oscura acoplada a una celda de electrólisis microbiana (MEC), utilizando cáscara de papa y raquis de maíz como sustratos. El objetivo principal fue determinar la influencia del tipo de residuo y del voltaje aplicado sobre la producción de biohidrógeno y la remoción de carga orgánica.

Los experimentos fueron desarrollados bajo un diseño factorial (2^2), evaluando dos niveles de voltaje (0.6 y 0.8 V) y dos tipos de sustrato. Los resultados demostraron que la cáscara de papa presentó el mejor rendimiento de producción de hidrógeno, alcanzando un valor máximo de 377 mL H_2 a 0.8 V, mientras que el menor rendimiento fue obtenido con raquis de maíz a 0.6 V con 194 mL H_2. Asimismo, el análisis estadístico evidenció que el voltaje aplicado fue el factor de mayor influencia sobre el proceso.

Por otro lado, el sistema integrado FO–MEC permitió alcanzar remociones de DQO superiores al 80 %, demostrando simultáneamente capacidad de generación energética y tratamiento biológico de residuos orgánicos. Finalmente, los resultados obtenidos evidencian que esta tecnología constituye una alternativa sostenible para la valorización de residuos agroorgánicos y la producción de energía renovable limpia.

Palabras clave: biohidrógeno, fermentación oscura, MEC, residuos orgánicos, DQO.

INTRODUCCION

En la actualidad, el incremento de la demanda energética y la contaminación ambiental generada por el uso de combustibles fósiles han impulsado la búsqueda de fuentes de energía renovable y sostenibles. Dentro de estas alternativas, el biohidrógeno ha supuesto gran importancia debido a su elevado contenido energético y a que su combustión produce únicamente agua, siendo considerado un combustible limpio y amigable con el medio ambiente.

Entre las tecnologías biológicas para la producción de hidrógeno, la fermentación oscura destaca por su capacidad de transformar residuos orgánicos en biohidrógeno mediante la acción de microorganismos anaerobios. Sin embargo, este proceso presenta limitaciones debido a que parte de la materia orgánica permanece en el efluente en forma de ácidos grasos volátiles. Por ello, la integración con celdas de electrólisis microbiana (MEC) permite aprovechar dichos compuestos residuales para incrementar la recuperación de hidrógeno mediante procesos bioelectroquímicos (Logan et al., 2008).

Por otro lado, la disposición inadecuada de residuos sólidos orgánicos representa una problemática ambiental importante en el Perú. Residuos como la cáscara de papa y el raquis de maíz poseen alto contenido de materia orgánica biodegradable, por lo que pueden ser aprovechados como sustratos para la producción de energía renovable. En este contexto, la valorización energética de residuos orgánicos se encuentra alineada con los principios de sostenibilidad y economía circular promovidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM).

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y evaluar un sistema integrado de producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos mediante fermentación oscura acoplada a una celda de electrólisis microbiana (MEC), utilizando cáscara de papa y raquis de maíz recolectados en la localidad de San Cristóbal, Llata-Huánuco. Asimismo, se evaluó la influencia del tipo de sustrato y del voltaje aplicado sobre la producción de biohidrógeno y la remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Los resultados obtenidos permitieron demostrar que la integración FO–MEC constituye una alternativa sostenible para la valorización energética de residuos orgánicos, contribuyendo simultáneamente a la reducción de contaminación ambiental, al aprovechamiento de residuos agroalimentarios y al desarrollo de tecnologías de energía renovable alineadas con los principios de economía circular y sostenibilidad promovidos por el Ministerio del Ambiente del Perú.

CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la localidad de San Cristóbal, perteneciente al distrito de Llata, departamento de Huánuco, no existe actualmente un sistema eficaz para el manejo y tratamiento de los residuos sólidos orgánicos generados por la población. Esta carencia en la gestión integral provoca que una parte significativa de los desechos orgánicos sea eliminada de forma inadecuada, lo que aumenta el riesgo de contaminación ambiental, afecta la salud de los habitantes y genera emisiones de gases de efecto invernadero debido a la descomposición anaerobia en botaderos sin control técnico. La falta de infraestructura tecnológica moderna y procesos de tratamiento adecuados evidencia una brecha significativa entre las necesidades ambientales locales y las prácticas actuales de manejo de residuos.

A nivel nacional, el Perú produce un volumen considerable de residuos sólidos municipales, estimándose en promedio más de 8.4 millones de toneladas al año, de las cuales una gran proporción corresponde a materia orgánica que podría ser aprovechada para procesos de valorización. Sin embargo, solo una fracción menor de estos residuos —alrededor de 148 500 toneladas— es actualmente valorizada mediante actividades de reciclaje impulsadas por el Ministerio del Ambiente, lo que representa una respuesta limitada frente al enorme potencial de aprovechamiento de estos desechos. Esta situación refleja que todavía existen barreras técnicas y operativas que impiden una gestión sostenible de los residuos sólidos orgánicos en muchas localidades, especialmente en zonas rurales o

periurbanas donde no hay implementación de soluciones tecnológicas avanzadas. MINAM (2024)

Frente a este contexto, surge la necesidad de explorar enfoques tecnológicos diferenciados que permitan transformar los residuos sólidos orgánicos en productos de valor agregado, tales como bioenergía o subproductos útiles, y que al mismo tiempo mejoren la sostenibilidad ambiental y socioeconómica de la gestión de residuos en San Cristóbal. La ausencia de alternativas tecnológicas integradas en la localidad representa una brecha en los esfuerzos por alcanzar metas de manejo sostenible de residuos, tal como se promueve en las políticas públicas ambientales del país. El presente estudio propone evaluar un tratamiento basado en la combinación de la fermentación oscura y una celdas de electrólisis microbiana (MEC), con el objetivo de contribuir a una gestión más efectiva y sostenible de los residuos sólidos orgánicos.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

- ¿De qué manera el diseño e implementacion de un sistema integrado de fermentación oscura acoplada a una celda de electrólisis microbiana (MEC) permite mejorar la producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos en la localidad de San Cristóbal, Llata – Huánuco?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECIFICOS

- ¿Cómo influye el tipo de residuo sólido orgánico en la producción de hidrógeno durante la fermentación oscura?

- ¿Cuál es el efecto del voltaje aplicado en la celda de electrólisis microbiana (MEC) sobre la producción de biohidrógeno?

- ¿Cuál es el rendimiento global del sistema integrado en términos de producción de hidrógeno y remoción de materia orgánica?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un sistema integrado de producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos mediante fermentación oscura acoplada a una celda de electrólisis microbiana (MEC) en la localidad de San Cristóbal, Llata – Huánuco.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la producción de hidrógeno a partir de diferentes residuos sólidos orgánicos en la etapa de fermentación oscura.

- Determinar el efecto del voltaje aplicado en la celda de electrólisis microbiana (MEC) sobre la producción de hidrógeno.

- Determinar el rendimiento global del sistema integrado en términos de producción de biohidrógeno y remoción de materia orgánica.

1.4. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación en cuestión, actualmente, es importante porque responde a la necesidad del desarrollo de tecnologías sostenibles que sean capaces de producir energía renovable y a la vez mitigar los efectos de la acumulación de residuos sólidos orgánicos. El aumento de residuos de origen agroalimentario y la dependencia de combustibles fósiles representan una problemática ambiental y energética que requiere de alternativas tecnológicas eficientes y sostenibles.

El análisis de sistemas integrados de fermentación oscura y celdas de electrólisis microbiana (FO–MEC) cobra valor en este ámbito, debido a su capacidad para convertir residuos orgánicos en biohidrógeno, el cual es considerado como un combustible limpio con alto potencial energético. Asimismo, la tecnología permite reducir a la vez la carga orgánica contaminante de los residuos mediante la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), otro aspecto que contribuye al mejoramiento del tratamiento biológico de las aguas residuales. La investigación es también importante en términos científico-tecnológicos, dado que proporciona datos experimentales sobre el comportamiento bioelectroquímico de residuos orgánicos locales como la cáscara de papa y el raquis de maíz, con un potencial interesante para ser utilizados energéticamente como materia prima en el Perú. Por otro lado, la investigación también contribuirá al desarrollo de tecnologías de valorización de residuos afín

de los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental que promueve el Ministerio del Ambiente (MINAM).

1.5. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se centró en el diseño y evaluación experimental de un sistema integrado de producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura acoplada a una celda de electrólisis microbiana (MEC), utilizando como sustratos residuos sólidos orgánicos de cáscara de papa y raquis de maíz recolectados en la localidad de San Cristóbal, Llata-Huánuco.

La investigación se realizó la caracterización fisicoquímica de los residuos orgánicos, la evaluación de la producción de biohidrógeno y el análisis de la remoción de DQO durante el tratamiento biológico. También se evaluó la influencia del tipo de sustrato y el voltaje aplicado en el MEC mediante un diseño experimental factorial (2^2). La investigación se realizó a escala laboratorio en condiciones controladas de operación, considerando voltajes de 0.6 V y de 0.8 V en el MEC. Los resultados de la investigación permitieron evaluar el comportamiento del sistema integrado FO–MEC y determinar las condiciones con mejor rendimiento de producción de biohidrógeno. No obstante, la investigación no incluye el escalamiento industrial del sistema ni evaluaciones económicas de los costos de implementación, operación o viabilidad económica. Ni tampoco se muestra la evaluación de otros residuos orgánicos o la evaluación de otras variables operativas como la temperatura, el tiempo de retención hidráulica o tipos de materiales de electrodos diferentes.

1.6. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION

La presente investigación se justifica por la necesidad de desarrollar alternativas para el aprovechamiento de residuos orgánicos y la producción de energías renovables. En el contexto actual, la acumulación de residuos orgánicos como la cáscara de papa y el raquis de maíz representa un problema ambiental debido a su disposición inadecuada, la cual puede generar emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación del suelo y del agua. Frente a esta problemática, se propone una estrategia de valorización mediante un sistema integrado de fermentación oscura y celda de electrólisis microbiana (MEC), orientado a transformar estos residuos en biohidrógeno, un combustible limpio y de alto poder energético.

Desde el punto de vista científico, la investigación aporta información sobre el comportamiento de dos residuos agroindustriales con diferente composición química, evaluando la influencia del tipo de sustrato y del voltaje aplicado en la producción de biohidrógeno. Asimismo, demuestra el potencial de integrar procesos biológicos y bioelectroquímicos para incrementar el rendimiento del hidrógeno y reducir la carga orgánica del efluente, contribuyendo al desarrollo de tecnologías más eficientes para el tratamiento y aprovechamiento de residuos.

En el ámbito ambiental, el estudio promueve los principios de la economía circular al convertir residuos de bajo valor comercial en un recurso energético, favoreciendo la reducción de la contaminación y el uso eficiente de la biomasa. Además, la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) contribuye a minimizar el impacto ambiental de los efluentes, en

concordancia con las políticas de gestión sostenible de residuos y protección de los recursos hídricos.

Desde la perspectiva tecnológica, la investigación evidencia que la aplicación de un sistema integrado de fermentación oscura y MEC constituye una alternativa viable para mejorar la recuperación energética de los residuos orgánicos mediante un bajo requerimiento de energía eléctrica externa. Los resultados obtenidos pueden servir como base para futuras investigaciones enfocadas en la optimización de parámetros operativos, el escalamiento del proceso y la implementación de sistemas de producción de biohidrógeno a nivel piloto o industrial.

Finalmente, el aporte social y económico de esta investigación radica en la posibilidad de impulsar el aprovechamiento sostenible de residuos generados por las actividades agrícolas, promoviendo la generación de energías limpias y la reducción de costos asociados a la disposición final de estos materiales. De esta manera, el estudio contribuye al desarrollo de tecnologías ambientalmente responsables que favorecen la transición hacia una matriz energética más sostenible y fortalecen la investigación en bioenergía dentro del ámbito académico y productivo.

1.7. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACION

La investigación se desarrolló a nivel de laboratorio; por lo que los resultados experimentales que se extraen son una aproximación experimental del comportamiento del sistema combinado FO–MEC. Por lo tanto, como ha sucedido en otras investigaciones del

mismo grupo de trabajo, no ha sido posible determinar el funcionamiento del proceso a nivel industrial o en una escala grande, lo que obliga a llevar a cabo a cabo futuros trabajos de investigación enfocados en el escalamiento y validación operacional del sistema.

Por otro lado, también se han dado limitaciones relacionadas con equipos y recursos que facilitan la realización de avances en el análisis del proceso bioelectroquímico, como son la eficiencia coulómbica o la caracterización microbiológica, como tampoco ha sido posible determinar experimentalmente el análisis del gas, por lo que parte de los resultados obtenidos han sido complementados con información bibliográfica y con cálculos teóricos de forma fundamentada.

Por último, la investigación se ha centrado en dos variables experimentales principales: el tipo de sustrato y el voltaje aplicado a la MEC, sólo las cáscaras de papa y raquis de maíz como residuos orgánicos. La mayor parte de las variables como la temperatura, el tiempo de retención hidráulica o diferentes materiales de electrodos han sido excluidos, así como estas mismas conclusiones que se extraen como resultado podrían cambiar en otras condiciones operativas.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

2.1. ANTECEDENTES NACIONALES

La fermentación de residuos sólidos orgánicos municipales se presenta como una opción innovadora para la valorización de residuos y de productos de valor añadido como los ácidos grasos volátiles (AGV). Los estudios realizados recientemente en Perú han evidenciado que la fermentación oscura de residuos urbanos y de lodos de plantas de tratamiento puede generar AGV de una forma controlada, modificando los parámetros de operación, como el pH o la temperatura, con el fin de utilizarlos posteriormente para bioplásticos y otros compuestos químicos sostenibles (Cerdán Morillo, 2020). Esta línea de investigaciones sirve como base para desarrollar propuestas de valorización de residuos a nivel local.

La fermentación de residuos sólidos de origen piscícola demuestra que los procesos anaerobios también pueden tener aplicación para subproductos y obtener compuestos útiles. En las investigaciones realizadas a cabo en la Estación Piscícola de Santa Eulalia, Lima, se evaluó la eficiencia de la fermentación láctica de residuos orgánicos, dejando de lado la importancia de ciertos parámetros, tales como la composición inicial del residuo o el tiempo de fermentación, en la producción de compuestos orgánicos de interés (Guzmán Roca, 2021). Esta línea de investigación demuestra que incluso los residuos con características mixtas o heterogéneas pueden ser utilizados a partir de procesos biológicos controlados.

El tratamiento de los lixiviados producidos durante la fermentación de residuos sólidos urbanos constituye uno de los pilares básicos para la sostenibilidad del manejo de los residuos. Orihuela Solier et al. (2023) evaluaron la degradación de la carga orgánica de los lixiviados mediante procesos avanzados, como el proceso de Foto-Fenton, tras la fermentación inicial de los residuos. Los resultados evidencian que la combinación de fermentación y tecnologías que complementan el tratamiento permite maximizar la recuperación de compuestos de interés y disminuir el impacto ambiental, siendo esto el marco directísimo para la aplicación de la fermentación oscura a los residuos sólidos urbanos.

La fermentación oscura permite no solo la producción de ácidos grasos volátiles, sino también de bioenergía, en concreto, de hidrógeno. Vásquez Flores (2020) llevó a cabo una revisión sistemática sobre el uso de fermentación oscura para la producción de hidrógeno a partir de residuos orgánicos, documentando la eficiencia del proceso a condiciones controladas de pH, temperatura y concentración de sustrato. Este enfoque ofrece base técnica para la valorización de residuos orgánicos de origen municipal mediante procesos anaerobios avanzados.

Las investigaciones realizadas a cabo en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco han mostrado también que la composición de los residuos sólidos orgánicos determina científicamente la aparición de ácidos grasos volátiles y de biogás en procesos de fermentaciones. De ahí que la elección de determinadas fracciones y la optimización de los parámetros de operación permiten incrementarla considerablemente, dejando notar la

posibilidad cierta de la utilización de nuevos procesos para la gestión de residuos municipales. De Jorge Humberto (2023).

2.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Lee y cols. (2022) se enfocaron en la evaluación del potencial de las celdas de electrólisis microbiana (MEC) conectadas a un proceso de fermentación oscura y como este tipo de metodología a contribuir a maximizar la producción de biohidrógeno mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos. Ellos añaden que , a pesar de que la fermentación oscura tiene limitaciones , dado que presenta un bajo rendimiento en la producción de hidrógeno a través de rendimientos termodinámicos negativos , se puede obtener un buen rendimiento en la producción de biohidrógeno mediante una celda MEC luego de la etapa de fermentación oscura . Esto permitiría la utilización de los ácidos grasos volátiles (AGV) aún presentes en el fermentado , así como mejorar el rendimiento general del sistema propuesto . De hecho , este tipo de sistema integrado (fermentación oscura y MEC) muestra un mejor desempeño energético que la fermentación oscura en la celda MEC por separado.

Magdalena et al. (2023) analizaron un sistema tipo secuencial formado por fermentación oscura seguido de una celda MEC utilizando como sustrato residuos alimentarios. En este tipo de trabajo se muestra que el perfil de AGV que se obtiene en la primera etapa condiciona la eficiencia electroquímica en la etapa posterior. Los resultados mostraron que existen maneras mediante el consorcio microbiano y el control de variables operativas para optimizar la producción de hidrógeno y la remoción de materia orgánica.

Hussien (2025) llevaron a cabo una evaluación de la integración sinérgica de la fermentación oscura y de la MEC para la producción de hidrógeno en el tratamiento de los efluentes derivados de los estiércoles porcinos, y observaron incrementos considerables de la producción de hidrógeno en comparación con los sistemas convencionales. Tal capacidad para mejorar la recuperación energética conlleva una reducción significativa de la demanda química de oxígeno del efluente tratado. Por tanto, los autores concluyen que la combinación de procesos biológicos con procesos electroquímicos puede considerarse como una adecuada alternativa para el tratamiento sostenible de residuos orgánicos complejos.

Un estudio de Cheng y Logan (2007) en relación a la producción de hidrógeno en una celda de electrólisis microbiana a partir de sustratos de origen orgánico provenientes de procesos de degradación biológica. En este trabajo se empleó un reactor bioelectroquímico alimentado mediante el acetato como fuente de carbono con el objetivo de comprobar cómo el voltaje aplicado influye en la producción de hidrógeno. Los resultados mostraron que al aplicar un voltaje externo de alrededor de 0.6 V, los microorganismos en el ánodo fueron capaces de oxidar la materia orgánica y de transferir electrones hacia el cátodo que dio lugar al hidrógeno gaseoso. Los sistemas fueron capaces de alcanzar eficiencias coulómbicas superiores al 80 %, mostrando así que las celdas de electrólisis microbiana son capaces de recuperar energía en forma de hidrógeno a partir de compuestos orgánicos residuales. Los autores concluyeron que esta tecnología podría integrarse satisfactoriamente a procesos biológicos como la fermentación oscura, mejorando así la conversión de residuos orgánicos en energía renovable.

Liu et al. (2022) realizaron una exhaustiva revisión sobre la aplicación de celdas MEC acopladas a la fermentación oscura para la producción sostenible de hidrógeno. Califican a la acumulación de metabolitos intermedios durante la fermentación como el limitante del rendimiento del proceso, aunque advierten que su posterior conversión en MEC permite aumentar el rendimiento total y, de este modo, conseguir una mayor estabilidad operativa. Este estudio aboga a favor de la aplicabilidad técnica de estos sistemas, integrados para la valorización energética de residuos sólidos orgánicos.

3.3. MARCO TEORICO

3.3.1. Residuos sólidos orgánicos

Los residuos sólidos orgánicos (RSO) son considerados como la fracción biodegradable de los residuos municipales, de donde se encuentran los restos de alimentos, los restos agrícolas y la materia vegetal. Son residuos que tienen un alto contenido de humedad y una gran carga orgánica, que en general se determina a partir de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Kaza et al., 2018). La fracción orgánica de los residuos puede superar el 50 % de los residuos generados en el país en vías de desarrollo, lo que pone de manifiesto su valor para los procesos de valorización energética.

En el caso del Perú, los residuos orgánicos en la gestión de los residuos sólidos contribuyen a la emisión de gases efecto invernadero, especialmente metano, generado por la descomposición anaeróbica en botaderos o rellenos sanitarios (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2022). Desde la perspectiva de la ingeniería química, los RSO pueden ser

considerados un recurso a ser transformado biotecnológicamente dada su riqueza en carbohidratos, proteínas y lípidos fermentables.

3.3.2. Fundamento bioquímico

Durante la fermentación, los carbohidratos se degradan a través de rutas metabólicas como la glucólisis, generando piruvato. Posteriormente, mediante la acción de enzimas como la hidrogenasa, se libera hidrógeno molecular (H_2). (Show et al., 2011).

Reacción simplificada:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$$

Sin embargo, el rendimiento real depende de condiciones como: pH, temperatura, concentración de sustrato, tipo de inóculo, etc. (Hallenbeck & Ghosh, 2009)

3.3.3. Celda de electrólisis microbiana (MEC)

La celda de electrólisis microbiana (MEC) es un sistema bioelectroquímico que utiliza microorganismos electroactivos para convertir materia orgánica residual en hidrógeno mediante la aplicación de un pequeño voltaje externo (≈0.2–1.0 V). Logan et al., (2008).

Principio de funcionamiento

En el ánodo: Microorganismos oxidan compuestos orgánicos y liberan electrones y protones

En el cátodo: Los protones se reducen y produce hidrógeno adicional

Esto permite aprovechar los ácidos generados en la fermentación oscura, aumentando la recuperación energética global.

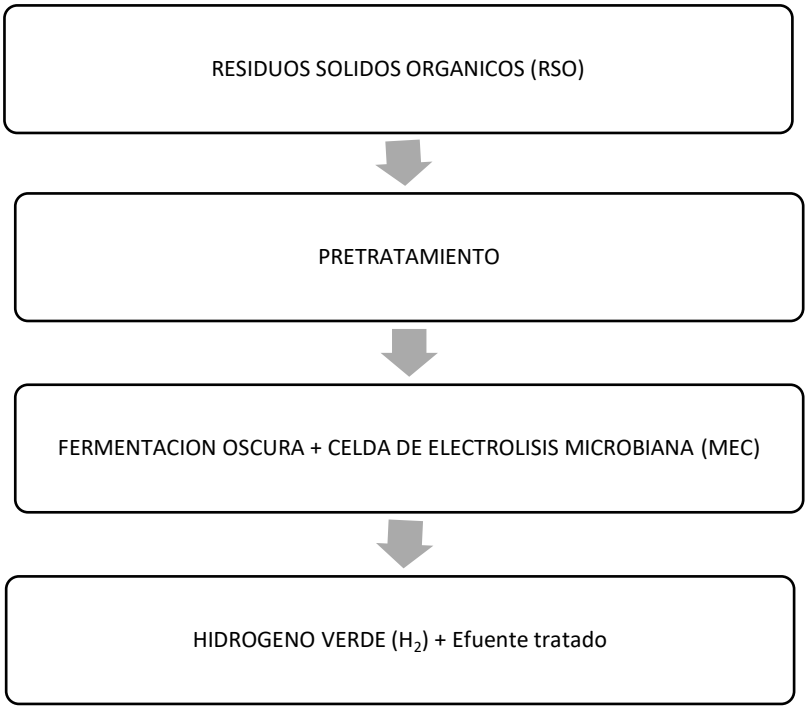
3.3.4. Integración fermentación oscura – MEC

La combinación de fermentación oscura con MEC ha sido propuesta como una estrategia para maximizar la recuperación energética de residuos orgánicos. Mientras la fermentación convierte carbohidratos en hidrógeno y ácidos orgánicos, la MEC transforma estos ácidos en hidrógeno adicional, elevando la eficiencia total del proceso (Pant et al., 2010).

La integración de ambos procesos permite: Incrementar el rendimiento total de H_2, Reducir carga orgánica residual y mejorar eficiencia energética global

Esquema conceptual: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO

Figura 1. Diagrama de bloques del proceso



Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Residuos orgánicos: cáscara de papa y raquis de maíz como sustratos para producción de biohidrógeno

La valorización de residuos sólidos orgánicos constituye una estrategia clave dentro del enfoque de economía circular, especialmente en contextos rurales donde la fracción biodegradable representa un alto porcentaje del total generado. Los residuos agroalimentarios, como subproductos de cultivos y procesamiento doméstico, contienen compuestos orgánicos fermentables que pueden transformarse en bioenergía mediante procesos biológicos anaerobios (Khanal, 2008). En este contexto, la fermentación oscura ha sido ampliamente estudiada como alternativa para la producción de hidrógeno a partir de residuos ricos en carbohidratos.

La cáscara de papa es un subproducto abundante derivado del consumo y procesamiento del tubérculo Solanum tuberosum, ampliamente cultivado en regiones andinas. Este residuo presenta un contenido significativo de almidón residual, celulosa, hemicelulosa y compuestos orgánicos fácilmente biodegradables, lo que le confiere un alto potencial como sustrato fermentable (Wu et al., 2012). La fracción de carbohidratos presentes en la cáscara puede ser hidrolizada y metabolizada por bacterias fermentativas para la generación de hidrógeno y ácidos grasos volátiles.

Tabla 1. Composición química proximal de cáscara de papa y raquis de maíz (base seca)

Componente	Cáscara de papa (%)	Raquis de maíz (%)
Carbohidratos totales	60 – 70	65 – 75
Celulosa	15 – 25	35 – 45
Hemicelulosa	10 – 20	30 – 40
Lignina	5 – 10	15 – 20
Proteínas	8 – 12	3 – 6
Cenizas	4 – 8	2 – 5

Fuente: Elaboración propia con base en Schieber, Stintzing y Carle (2001); Sun y Cheng (2002); Demirbas (2009); Hendriks y Zeeman (2009).

Desde el punto de vista composicional, la cáscara de papa contiene entre 40 y 60 % de carbohidratos estructurales y no estructurales en base seca, además de pequeñas proporciones de proteínas y minerales, lo que favorece una relación carbono/nitrógeno adecuada para

procesos anaerobios (Schieber, Stintzing, & Carle, 2001). Esta composición facilita su degradación microbiana sin generar concentraciones elevadas de amoníaco, lo que podría inhibir la producción de hidrógeno.

Diversos estudios han reportado que residuos ricos en almidón, como la papa y sus subproductos, presentan rendimientos favorables en fermentación oscura, debido a que la glucosa liberada durante la hidrólisis puede seguir rutas metabólicas productoras de hidrógeno, como la vía acetogénica (Lay, 2001). En condiciones óptimas de pH y temperatura, estos sustratos permiten alcanzar producciones significativas de biohidrógeno en sistemas batch.

Por otro lado, el raquis de maíz, correspondiente al eje central de la mazorca tras la remoción de los granos, es un residuo lignocelulósico ampliamente disponible en zonas agrícolas. Este material está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, formando una estructura compleja que requiere pretratamientos para mejorar su biodegradabilidad (Sun & Cheng, 2002). A pesar de su naturaleza estructural, representa una fuente importante de carbohidratos poliméricos potencialmente convertibles en azúcares fermentables.

Tabla 2. Relación carbono/nitrógeno (C/N)

Materia prima	Relación C/N aproximada
Cáscara de papa	20 – 30
Raquis de maíz	60 – 90
Rango óptimo fermentación	20 – 30

Fuente: Elaboración propia con base en Khanal (2008); Demirbas (2009); Lay, Li y Noike (1999).

La fracción celulósica del raquis de maíz puede ser hidrolizada mediante tratamientos físicos, químicos o térmicos para liberar glucosa y otros monosacáridos, los cuales pueden ser posteriormente fermentados para producir hidrógeno (Hendriks & Zeeman, 2009). Sin embargo, la presencia de lignina puede limitar la accesibilidad enzimática y reducir la eficiencia del proceso si no se aplica un acondicionamiento previo adecuado.

Desde una perspectiva energética, los residuos lignocelulósicos como el raquis de maíz poseen un alto contenido de carbono estructural, lo que los convierte en materias primas estratégicas para procesos de bioenergía avanzada (Demirbas, 2009). Su utilización contribuye a la reducción de residuos agrícolas y a la diversificación de fuentes renovables en sistemas rurales.

En comparación con residuos ricos en almidón, los materiales lignocelulósicos suelen presentar cinéticas de degradación más lentas; no obstante, su disponibilidad y bajo costo los hacen atractivos para estudios de integración tecnológica, como sistemas combinados de fermentación oscura y celda de electrólisis microbiana (Logan et al., 2008). La implementación de estos residuos como sustratos permite evaluar estrategias de valorización energética sostenible en comunidades agrícolas.

En síntesis, tanto la cáscara de papa como el raquis de maíz representan residuos orgánicos con potencial para la producción de biohidrógeno. La primera destaca por su alta biodegradabilidad y contenido de carbohidratos fácilmente fermentables, mientras que el segundo constituye una biomasa lignocelulósica abundante que requiere pretratamiento para maximizar su conversión. La selección de estos materiales como materia prima en procesos de fermentación oscura integrados con tecnologías bioelectroquímicas se fundamenta en su disponibilidad local, composición química y potencial energético.

3.3.6. Cinética del proceso de producción de biohidrógeno

La cinética de producción de biohidrógeno en procesos de fermentación oscura describe la velocidad a la cual los microorganismos convierten la materia orgánica en hidrógeno bajo condiciones anaerobias. Este comportamiento depende de factores como la concentración del sustrato, la actividad microbiana y las condiciones operativas del sistema. Para representar matemáticamente este proceso, se emplean modelos cinéticos que permiten estimar parámetros como la velocidad máxima de producción y el tiempo de adaptación microbiana (Lay et al., 1999).

Uno de los modelos más utilizados es el modelo de Gompertz modificado, el cual permite describir la producción acumulada de hidrógeno en función del tiempo. Este modelo considera una fase de latencia, seguida de una fase exponencial de producción y finalmente una fase estacionaria, lo que lo hace adecuado para procesos biológicos discontinuos. La ecuación se expresa como:

$$H(t) = H_{max} \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_{max} \cdot e}{H_{max}}(\lambda - t) + 1\right]\right\}$$

donde H(t) es la producción acumulada de hidrógeno, Hmax la producción máxima, Rmax la velocidad máxima y λ el tiempo de fase lag (Zwietering et al., 1990).

Asimismo, el modelo de Monod es utilizado para describir la relación entre la velocidad de crecimiento microbiano y la concentración del sustrato, siendo útil para comprender la eficiencia del proceso en sistemas continuos o semi-continuos (Monod, 1949). Estos modelos permiten optimizar las condiciones operativas y predecir el comportamiento del sistema, contribuyendo al diseño y evaluación del proceso integrado de fermentación oscura y celda de electrólisis microbiana.

3.3.7. Producción de biohidrógeno

La producción de biohidrógeno constituye una alternativa sostenible frente a los combustibles fósiles tradicionales, debido a su alto contenido energético y a que su combustión no genera emisiones contaminantes, produciendo únicamente agua como subproducto. En este sentido, el hidrógeno se posiciona como un vector energético clave en la transición hacia sistemas energéticos más limpios y sostenibles (Das & Veziroglu, 2001).

Métodos de producción de hidrógeno

a) Métodos biológicos

Los métodos biológicos se basan en la actividad metabólica de microorganismos capaces de transformar materia orgánica en hidrógeno bajo condiciones controladas. Entre los procesos más relevantes se encuentran la fermentación oscura, la foto fermentación y los sistemas bioelectroquímicos como las celdas de electrólisis microbiana (MEC). La fermentación oscura es uno de los métodos más estudiados debido a su capacidad de utilizar una amplia variedad de residuos orgánicos como sustrato, operando en ausencia de luz y produciendo hidrógeno junto con compuestos intermedios como ácidos orgánicos (Hallenbeck & Ghosh, 2009).

Por su parte, las celdas de electrólisis microbiana permiten convertir los productos intermedios de la fermentación en hidrógeno adicional mediante la aplicación de un voltaje externo, incrementando la eficiencia global del proceso. Estos sistemas integrados han demostrado ser una alternativa prometedora para maximizar la recuperación energética a partir de residuos orgánicos (Logan et al., 2008).

b) Métodos termoquímicos

Los métodos termoquímicos implican la conversión de materiales mediante procesos a altas temperaturas, tales como la gasificación, la pirólisis y el reformado de hidrocarburos. La gasificación, por ejemplo, permite transformar biomasa en un gas de síntesis rico en hidrógeno mediante reacciones a temperaturas superiores a 700 °C. Sin embargo, estos procesos requieren un alto consumo energético y condiciones operativas más complejas, lo

que puede limitar su aplicación en comparación con los métodos biológicos (Balat & Kirtay, 2010).

A su vez, el reformado con vapor de hidrocarburos es el método industrial más extendido para la obtención de hidrógeno, a pesar de su dependencia de recursos de origen no renovable y de que la reacción produce emisiones de Dióxido de carbono, lo que merma considerablemente su sostenibilidad ambiental (Turner, 2004).

3.3.8. Ventajas del biohidrógeno

El biohidrógeno tiene múltiples ventajas que lo convierten en una fuente de energía í a interesante a día de hoy. Primero, su producción a partir de residuos orgánicos ayuda a la valorización de los residuos, que se traducirá en recibir la menor cantidad de residuos en disposición final y que provoca problemas ambientales (Show et al., 2011).

En segundo lugar, el empleo de biohidrógeno como combustible tiene un efecto positivo sobre el medio ambiente, ya que la combustión de este no da lugar a la emisión de gases contaminantes o efecto invernadero y colabora a poder disminuir la huella de carbono. Por otro lado, el manejo de los procesos biológicos se efectúa en condiciones de presión y temperatura moderadas, lo que implica menores requisitos energéticos comparados con la producción de hidrógeno a través de procesos termoquímicos (Hallenbeck & Ghosh, 2009).

Finalmente, el uso de tecnologías como la fermentación oscura y las celdas de electrólisis microbiana puede ayudar a mejorar la eficiencia global y la recuperación de hidrógeno, lo que

también es apoya un concepto de economía circular en la que los residuos se convierten en recursos energéticos valiosos (Logan & Rabaey, 2012).

3.3.9. Cálculos para la evaluación del proceso de producción de biohidrógeno

Para evaluar el sistema integrado de fermentación oscura y celda de electrólisis microbiana se requieren relaciones matemáticas que permitan cuantificar, entre otras cosas, la producción de hidrógeno, la eficiencia del proceso y la remoción de materia orgánica. Estos parámetros son imprescindibles para poder evaluar el sistema integrado de fermentación oscura y celda de electrólisis microbiana a partir de diferentes condiciones de operación (Logan et al., 2008).

Producción de biohidrógeno

La producción acumulada de hidrógeno se calcula a partir del volumen total de gas generado durante todo nuestro proceso:

$$\boldsymbol{H_{total} = \sum V_{H_2}}$$

Donde:

H_{total} : Producción total de hidrógeno (mL)

V_{H2} : Volumen de hidrógeno medido en cada intervalo

Este parámetro permite cuantificar el potencial del sistema para generar energía a partir de residuos orgánicos (Hallenbeck & Ghosh, 2009).

Rendimiento de hidrógeno

El rendimiento de hidrógeno se determina como la relación de división entre la cantidad de hidrógeno producido y la cantidad de sustrato consumido:

$$Y_{H_2} = \frac{mol\ de\ H_2}{mol\ de\ sustrato}$$

Este indicador nos evalua la eficiencia de conversión del proceso, comparando los resultados experimentales con los valores teóricos esperados (Das & Veziroglu, 2001).

Conversión de volumen a moles (ecuación de gas ideal)

Para convertir el volumen de hidrógeno medido a cantidad de sustancia, se usa la ecuación de los gases ideales:

$$n = \frac{P \times V}{R \times T}$$

Donde:

n: número de moles de H_2

P: presión (atm)

V: volumen (L)

R: constante de los gases (0.08206 L·atm/mol·K)

T: temperatura (K)

Este cálculo es necesario para expresar los resultados en unidades molares y facilitar la comparación con otros estudios (Logan et al., 2008).

Remoción de DQO

La eficiencia del tratamiento del residuo se calcula mediante la ecuación de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), calculada como:

$$\boldsymbol{Remocion\ de\ DQO}\ (\%) = \frac{\boldsymbol{DQO_{inicial} - DQO_{final}}}{\boldsymbol{DQO_{inicial}}} \times \mathbf{100}\%$$

Este parámetro permite evaluar la capacidad del sistema para reducir la carga orgánica del sustrato (Metcalf & Eddy, 2014).

BALANCE DE MATERIA GLOBAL

El proceso puede representarse mediante un balance de materia general:

$$\boldsymbol{Entrada = Salida + Acumulacion}$$

$$\boldsymbol{m_{sustrato} + m_{agua} + m_{inoculo} = m_{H_2} + m_{CO_2} + m_{acetato} + m_{biomasa} + m_{efluente}}$$

Agrupando productos finales:

$$\boldsymbol{m_{entrada} = m_{H_2(total)} + m_{CO_2(total)} + m_{biomasa} + m_{efluente\ tratado}}$$

Donde:

$$m_{H_2(total)} = m_{H_2(FO)} + m_{H_2(MEC)}$$

$$m_{CO_2(total)} = m_{CO_2(FO)} + m_{CO_2(MEC)}$$

La materia orgánica del sustrato es transformada en:

- ✓ Entradas:
  - Residuo orgánico (sustrato)
  - Agua
  - Nutrientes
- ✓ Salidas:
  - Hidrógeno (H_2)
  - CO_2
  - Ácidos orgánicos
  - Biomasa
  - Efluente tratado

4. Reacciones representativas

- Fermentación oscura (vía acética)

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$$

- Fermentación (vía butírica)

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$$

La vía metabólica que se sigue durante la fermentación oscura depende de diferentes factores operativos; uno de los más influyentes es el pH. A un pH ligeramente ácido (pH 5.5–6.5), se favorece la vía acética, que presenta un mayor rendimiento de hidrógeno. En cambio, en un pH más ácido predomina la vía butírica, que es la que produce menos hidrógeno. Igualmente, otros parámetros como la presión parcial de hidrógeno, la concentración del sustrato, la temperatura y la comunidad microbiana que realiza la fermentación oscura

pueden influir en el patrón de productos obtenidos. En este estudio se busca favorecer la vía acética para conseguir un mayor rendimiento en la producción de biohidrógeno. (Hallenbeck y Ghosh, 2009)

- **MEC (conversión de acetato)**

$$CH_3COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 4H_2$$

Este balance permite evaluar la distribución de los productos generados durante el proceso (Show et al., 2011).

5. Balance para el agua en el sistema integrado FO-MEC

Aplicando la conservación de la masa al agua:

$$H_2O_{entrada} = H_2O_{salida} + H_2O_{consumida} - H_2O_{formada}$$

Entrada de agua

El agua ingresa al sistema mediante:

- Agua utilizada para preparar el sustrato.
- Humedad propia de la cáscara de papa o del raquis de maíz.
- Agua contenida en el estiércol vacuno (inóculo).
- Soluciones nutritivas, si fueron añadidas.

Por tanto:

$$H_2O_{entrada} = H_2O_{preparacion} + H_2O_{humedad} + H_2O_{inoculo}$$

Consumo de agua

En la FO:

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$$

Aquí: 2 moles de agua participan en la reacción.

En la MEC:

$$CH_3COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 4H_2$$

Aquí también: 2 moles de agua participan en la oxidación del acetato.

Formación de agua

Durante la absorción del CO_2 con NaOH ocurre:

$$CO_2 + 2NaO \rightarrow Na_2CO_2 + H_2O$$

Es decir: se forma una molécula de agua por cada molécula de CO_2 capturada.

Agua evaporada

- Como el reactor trabajó a: 35 °C
- la presión fue cercana a la atmosférica,
- no existe evaporación significativa.

El punto de ebullición es: 100 °C

Por tanto: 35 °C << 100 °C

No se genera vapor de agua de importancia.

Eficiencia del sistema

La eficiencia del proceso puede evaluarse comparando la producción obtenida con la producción teórica máxima:

$$\boldsymbol{Eficiencia}\ (\%) = \frac{\boldsymbol{H_2\ experimental}}{\boldsymbol{H_2\ teorico}} \times \mathbf{100}\%$$

Este indicador permite determinar el grado de aprovechamiento del sustrato en la producción de biohidrógeno (Hallenbeck & Ghosh, 2009).

Para la evaluación del desempeño del sistema integrado, se utilizaron distintas fórmulas que tienen que ver con la producción de hidrógeno, con el rendimiento del proceso y con la remoción de materia orgánica; distribución de hidrógeno que se deriva del volumen acumulado generado, rendimiento que se calcula como el valor de la relación hidrógeno producido / sustrato consumido y el cálculo de la remoción de DQO sirve para evaluar la eficiencia del tratamiento del residuo. Todos estos parámetros junto con el balance de materia, junto con la eficiencia global del sistema constituyen una cuantificación básica para analizar el comportamiento del proceso en distintas condiciones experimentales.

3.3.10. Características de la materia prima

Los residuos sólidos orgánicos corresponden a materiales biodegradables que se originan principalmente de restos de alimentos, subproductos agrícolas, residuos generados en mercados y residuos provenientes de actividades domésticas y de jardinería. Este tipo de residuos se caracteriza por contener una elevada proporción de compuestos orgánicos tales como carbohidratos, proteínas, lípidos y componentes lignocelulósicos. Debido a esta

composición, dichos materiales pueden ser aprovechados mediante procesos biológicos o termoquímicos para la generación de energía y productos de valor agregado (Khanal, 2008).

Una propiedad relevante de los residuos orgánicos es su capacidad de degradación biológica, lo cual permite que estos materiales sean transformados por microorganismos bajo condiciones controladas, ya sea en ambientes aerobios o anaerobios. La abundancia de carbono presente en estos residuos los convierte en un sustrato apropiado para diferentes procesos biotecnológicos, entre ellos la digestión anaerobia y la fermentación oscura, tecnologías que permiten obtener productos energéticos como biogás o hidrógeno (Demirbas, 2009).

Otro aspecto importante asociado a este tipo de residuos es su elevado contenido de humedad, que generalmente se encuentra dentro de un rango aproximado entre 60 % y 85 %. Esta característica favorece la actividad microbiana, ya que el agua facilita la disolución de los compuestos orgánicos y su disponibilidad para los microorganismos encargados de la degradación. Sin embargo, el alto contenido de humedad también puede ocasionar dificultades durante su almacenamiento y manejo, debido a la rápida descomposición de la materia orgánica y la posible generación de olores desagradables (Tchobanoglous, Theisen & Vigil, 1993).

Desde el punto de vista de su composición química, los residuos sólidos orgánicos presentan una cantidad significativa de compuestos carbonados, principalmente carbohidratos estructurales y no estructurales como almidón, celulosa y hemicelulosa. Estos compuestos

pueden ser hidrolizados y posteriormente metabolizados por bacterias anaerobias, generando productos intermedios tales como ácidos grasos volátiles, así como gases como hidrógeno y dióxido de carbono. En el caso de residuos de origen agrícola, como el raquis de maíz, la presencia de componentes lignocelulósicos puede requerir la aplicación de pretratamientos que faciliten su degradación (Hendriks & Zeeman, 2009).

Asimismo, los residuos orgánicos presentan una relación carbono-nitrógeno (C/N) que usualmente se encuentra dentro de un intervalo aproximado entre 20 y 40, rango considerado adecuado para el desarrollo de procesos biológicos anaerobios. Un equilibrio apropiado entre estos elementos es fundamental para el crecimiento microbiano, ya que evita la acumulación de compuestos potencialmente inhibidores, como el amoníaco, y contribuye a mejorar la eficiencia en la conversión del sustrato durante los procesos de tratamiento biológico (Khanal, 2008).

Finalmente, desde una perspectiva energética y ambiental, los residuos sólidos orgánicos poseen un alto potencial de valorización, puesto que pueden ser transformados mediante tecnologías biotecnológicas en diversas formas de energía renovable, como biogás, biohidrógeno o biocombustibles. En este sentido, el aprovechamiento de estos residuos constituye una alternativa sostenible que permite simultáneamente reducir los impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada y promover la producción de energía limpia (Demirbas, 2009).

3.3.11. Demanda química de oxígeno (DQO) de los residuos orgánicos (cascara de papa y raquis de maíz)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro ampliamente utilizado para cuantificar la cantidad de materia orgánica presente en residuos orgánicos, permitiendo evaluar su potencial de biodegradabilidad y su aptitud como sustrato en procesos biológicos como la fermentación oscura. En este contexto, los residuos lignocelulósicos y ricos en carbohidratos presentan valores elevados de DQO debido a su alta carga orgánica (Zhang et al., 2007).

En el caso de la cáscara de papa, diversos estudios han reportado valores de DQO relativamente altos, asociados a su contenido significativo de almidón y compuestos orgánicos fácilmente biodegradables. Se han registrado valores típicos de DQO en el rango de 80 000 a 120 000 mg/L en extractos o suspensiones acuosas de este residuo, lo que evidencia su elevado potencial como sustrato para la producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura (Wang & Zhao, 2009).

Por otro lado, el raquis de maíz, al ser un residuo lignocelulósico con mayor proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina, presenta valores de DQO también elevados, aunque su biodegradabilidad es más limitada en comparación con residuos ricos en almidón. Se han reportado valores de DQO en el rango de 60 000 a 100 000 mg/L, dependiendo del grado de pretratamiento aplicado, lo cual indica que, si bien contiene una alta carga orgánica, su conversión biológica requiere condiciones más controladas (Li et al., 2012).

Estos valores de DQO reflejan que ambos residuos poseen un alto contenido de materia orgánica, lo que los convierte en sustratos adecuados para procesos de valorización energética. Sin embargo, las diferencias en su composición química determinan en la eficiencia de degradación y en la producción de biohidrógeno, siendo la cáscara de papa más fácilmente degradable que el raquis de maíz (Ren et al., 2010).

3.3.12. Normativa ambiental y gestión de residuos orgánicos

La adecuada gestión de los residuos sólidos orgánicos constituye uno de los principales retos medioambientales actuales, debido al incremento en la producción de residuos que provocan las actividades domésticas, agrícolas e industriales. La acumulación y la gestión inadecuada de residuos puede dar lugar a un impacto negativo sobre el suelo, el agua y la atmósfera, provocando la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano (CH_4), ya que medio anaerobio no controlado también es originario de productos de degradación (Kaza et al., 2018). Para la gestión medioambiental, los residuos orgánicos se convierten en recursos con potencial de aprovechamiento, en la medida en que dichos materiales son susceptibles de ser transformados a través de tecnología biológica sostenible en productos de valor como el biogás, el compost, el biohidrógeno, etc. Este planteamiento está á en consonancia con los principios de economía circular que fomentan el aprovechamiento de residuos como recursos y la reducción de la disposición final en rellenos sanitarios (Comisión Europea, 2020).

En el Perú, la gestión integral de los residuos sólidos se encuentra de forma pública regulada por lo dispuesto en el Decreto Legislativo N° 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, que tiene como finalidad la adopción de medidas orientadas a la minimización de la generación de los residuos y a su valorización como método para reaprovecharlo. La norma aprobada promueve el uso de tecnologías sostenibles que permitan reducir el impacto ambiental que produce la mala gestión de los residuos orgánicos MINAM (2017).

Por otro parte, el reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos aprobado por el Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM que establece directrices para la segregación, aprovechamiento y tratamiento de los residuos sólidos priorizando alternativas de valorización energética y recuperación de los materiales. En esta línea, los procesos biotecnológicos como la fermentación oscura y celda de electrólisis microbiana son alternativas adecuadas para la gestión de los residuos orgánicos y para la producción de energía renovable (MINAM, 2017).

Además, en el orden internacional, instituciones como la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y la Agencia Internacional de Energía (IEA) fomentan el desarrollo de tecnologías limpias para la transición energética y la disminución de emisiones contaminantes. En este sentido, la generación de biohidrógeno a partir de residuos orgánicos contribuye de forma directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados principalmente con energía asequible y no contaminante, producción responsable y acción por el clima (Naciones Unidas, 2015).

Por lo tanto, la ejecución de sistemas integrados de fermentación oscura y celda de electrólisis microbiana se convierte no solo en una alternativa tecnológica de producción de energía limpia sino también en una estrategia sostenible para la gestión de residuos y valorización de Residuos Sólidos Orgánicos en comunidades locales.

3.3.13. Valores permisibles de DQO según normativa peruana

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se utiliza para determinar la cantidad de materia orgánica presente en el agua o en efluentes residuales. En el Perú, los valores que están permitidos son establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM) mediante los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP).

Tabla 3. Tabla de los valores permisibles de DQO según normativa peruana

Norma	Tipo de agua o efluente	Valor máximo de DQO
D.S. N.° 004-2017-MINAM	Agua para consumo humano con tratamiento avanzado	≤ 10 mg/L
D.S. N.° 004-2017-MINAM	Agua para consumo humano con tratamiento convencional	≤ 5 mg/L
D.S. N.° 003-2010-MINAM	Efluentes de PTAR domésticas y municipales	≤ 200 mg/L
Referencia técnica de aguas residuales industriales	Efluentes industriales tratados	250–500 mg/L
Referencia bibliográfica de residuos orgánicos	Lixiviados y residuos orgánicos sin tratar	2,000–20,000 mg/L

Fuente: Elaboración propia con base en el MINAM, (2010, 2017)

Tabla 4. Tabla de los valores aproximados de residuos y lodos orgánicos

Residuo orgánico	DQO típica aproximada
Cáscara de papa	8,000 – 15,000 mg/L
Residuos alimentarios	10,000 – 25,000 mg/L
Raquis de maíz hidrolizado	5,000 – 12,000 mg/L
Lodos orgánicos	15,000 – 30,000 mg/L

Fuente: Elaboración propia con base la literatura P. C. Hallenbeck. (2009)

CAPITULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. HIPÓTESIS PRINCIPAL

El diseño e implementación de un sistema integrado de fermentación oscura acoplada a una celda de electrólisis microbiana (MEC) incrementa significativamente la producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos en la localidad de San Cristóbal, Llata – Huánuco.

3.2. HIPÓTESIS ESPECIFICAS

- El tipo de residuo sólido orgánico influye significativamente en la producción de hidrógeno durante la fermentación oscura.

- El voltaje aplicado en la celda de electrólisis microbiana (MEC) incrementa significativamente la producción de hidrógeno.

- El sistema integrado presenta un mayor rendimiento en comparación con la fermentación oscura de manera independiente.

3.3. VARIABLES DE RESPUESTA

3.3.1. Variables independientes (VI)

Son las variables que tú manipulas o controlas experimentalmente.

- ✓ **Tipo de residuo sólido orgánico**

Tipo: cualitativa nominal

- Cáscara de papa
- Raquis de maíz

✓ **Voltaje aplicado en la celda de electrólisis microbiana (MEC)**

Tipo: cuantitativa continua

- Rango: 0.6 – 0.8 V

Tabla 5. Resumen de las variables independientes y rangos operativos

Variable independiente	Símbolo	Rango experimental	Unidad	Referencia
Tipo de sustrato	S	Cáscara de papa / Raquis de maíz	g	Khanal, 2008
Voltaje aplicado en MEC	V	0.6 – 0.8	V	Logan et al., 2008

Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica sobre la producción de biohidrógeno

3.3.2. Variables dependientes (VD)

1. **Producción de biohidrógeno (variable principal)**

- Unidad: mL o mol (mide la cantidad total de H_2 producido)

2. Rendimiento de hidrógeno

- Unidad: mol H_2 / mol sustrato (mide la eficiencia de conversión)

3. Remoción de materia orgánica (DQO)

- Unidad: % (Mide: reducción de carga orgánica)

3.3.3. Variables de control (VC)

- ✓ Volumen del reactor (1 L)
- ✓ Temperatura de fermentación (35 °C)
- ✓ Agitación (120 rpm)
- ✓ Ausencia de oxígeno (condiciones anaerobias)
- ✓ Concentración de sustrato (g/L) 15
- ✓ pH inicial del sistema: 5.0 – 6.5 (óptimo para fermentación oscura)
- ✓ Tiempo de retención hidráulica (TRH) 24 - 48 horas

CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. LUGAR Y TIEMPO

El lugar determinado donde se realizará el diseño de planta será Llata-Huamalíes-Huánuco, el tiempo del proceso experimental será 4 meses de febrero-mayo del 2026.

Coordenadas de San Cristóbal (centro poblado)

Latitud: 9°32′44.6″ S (-9.545710°)

Longitud: 76°50′18.9″ W (-76.838576°)

Altitud: 3,596 m.s.n.m.

Figura 2. Mapa de localización de San Cristóbal, distrito de Llata, provincia de Huamalíes, región Huánuco – Perú.



Fuente: Instituto Geografico del Peru IGP

4.2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL EXPERIMENTAL

4.2.1. Origen domiciliario (residencial)

Provienen de las viviendas y constituyen la mayor fracción de los residuos municipales. Restos de alimentos (cáscaras de frutas y verduras), residuos de cocina, restos de pan, arroz, café y residuos de poda doméstica.

4.2.2. Origen comercial

Generados en establecimientos comerciales como: mercados, restaurantes, hoteles, incluyen grandes volúmenes de: Restos de frutas y verduras. Este tipo de residuo es muy importante para una planta de compostaje porque suele ser relativamente homogéneo y fácil de recolectar.

4.2.3. Origen agropecuario

Provenientes de actividades agrícolas y pecuarias: Restos de cosecha, rastrojos, estiércol animal, residuos de procesamiento agrícola. Este origen es clave en zonas altoandinas como Llata, donde la actividad agrícola es predominante.

4.2.4. Cantidad de RSO (toneladas por mes)

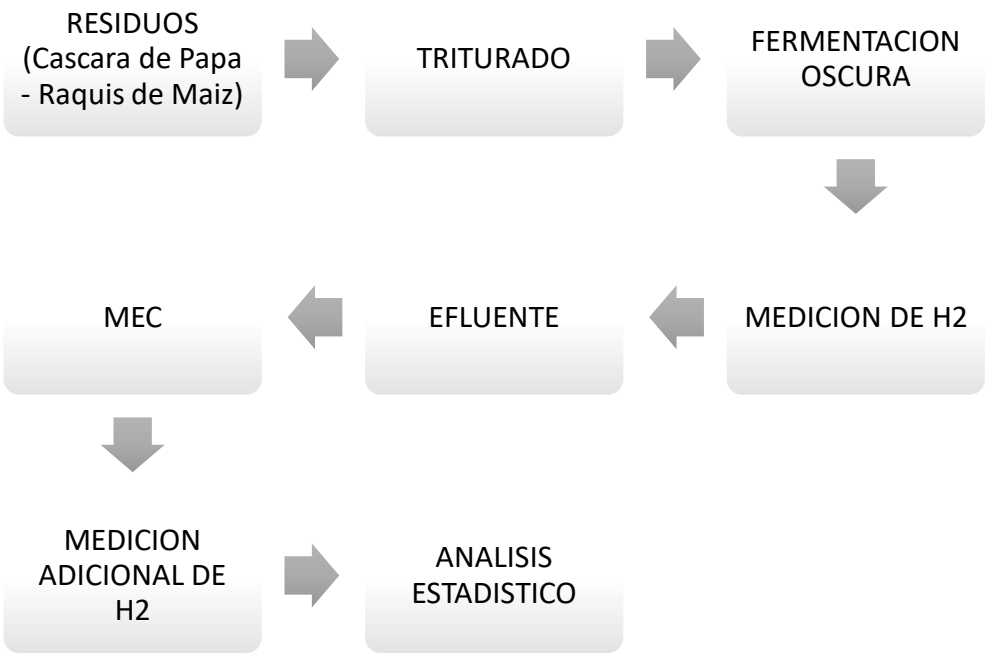
La cantidad de residuos sólidos que se aglomeran en nuestra localidad a estudios según MINAM (2020) y datos de la Municipalidad Distrital de Llata son aproximadamente 45-50 Toneladas/mes en el botadero del centro poblado de San Cristóbal.

4.3. DISEÑO DE INVESTIGACION

- ✓ **SEGÚN SU FINALIDAD:** Investigación aplicada
- ✓ **SEGÚN SU ENFOQUE:** Cuantitativa **(**balances de materia y energía, modelamiento de procesos, cálculo de rendimientos, evaluación económica)
- ✓ **SEGÚN SU ALCANCE:** Descriptiva – Explicativa – Propositiva

4.4. ESQUEMA METODOLOGICO

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA METODOLOGIA



Fuente: Elaboración Propia

4.5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.5.1. Recolección y preparación de muestras

Los residuos sólidos orgánicos utilizados en la investigación fueron cáscara de papa y raquis de maíz, recolectados en mercados y zonas agrícolas de la localidad de San Cristóbal, Llata-Huánuco. Las muestras fueron seleccionadas manualmente eliminando materiales extraños como plásticos, piedras, tierra y restos metálicos, con la finalidad de evitar interferencias durante el proceso experimental.

Posteriormente, los residuos fueron lavados con agua destilada para remover impurezas superficiales y secados a temperatura ambiente durante 24 horas. Luego, las muestras fueron trituradas utilizando un molino triturador de laboratorio hasta obtener partículas de aproximadamente 1–5 mm de diámetro, favoreciendo así una mayor superficie de contacto para la degradación microbiana. Finalmente, los residuos triturados fueron almacenados en recipientes herméticos a 4 °C hasta su utilización experimental.

4.5.2. Caracterización fisicoquímica del sustrato

Los residuos orgánicos fueron caracterizados mediante análisis fisicoquímicos previos al proceso biológico, con el objetivo de determinar sus propiedades iniciales y evaluar su potencial para la producción de biohidrógeno.

Se determinaron los siguientes parámetros:

- ✓ pH

- ✓ Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- ✓ Sólidos totales
- ✓ Humedad
- ✓ Conductividad eléctrica

El pH fue medido mediante un potenciómetro digital previamente calibrado. La DQO se determinó utilizando el método colorimétrico con digestión cerrada y lectura espectrofotométrica. La humedad y los sólidos totales fueron determinados mediante métodos gravimétricos utilizando estufa de secado.

4.5.3. Pretratamiento del sustrato

Con el objetivo de incrementar la biodegradabilidad del material orgánico y facilitar la liberación de compuestos fermentables, los residuos fueron sometidos a un pretratamiento térmico.

Para ello, se preparó una suspensión del residuo triturado con agua destilada en relación sólido-líquido adecuada. Posteriormente, la mezcla fue colocada en un reactor batch y calentada entre 80 y 90 °C durante 30 minutos utilizando una placa calefactora con agitación constante. Finalizado el tratamiento térmico, el sustrato fue enfriado hasta temperatura ambiente antes de ser utilizado en la fermentación oscura.

4.5.4. Preparación del inóculo

Como fuente microbiana se empleó estiércol vacuno. Con la finalidad de inhibir microorganismos consumidores de hidrógeno, principalmente bacterias metanogénicas, el inóculo fue sometido a un choque térmico. El tratamiento consistió en calentar el lodo anaerobio a 90 °C durante 20 minutos. Posteriormente, el inóculo fue enfriado a temperatura ambiente y almacenado en condiciones anaerobias hasta su utilización.

4.5.5. Proceso de fermentación oscura

Inicialmente, cada reactor fue cargado con el sustrato previamente acondicionado y el inóculo anaerobio. El pH inicial fue ajustado a 5.5 utilizando soluciones de HCl y NaOH, debido a que este rango favorece la actividad de bacterias productoras de hidrógeno. Posteriormente, los reactores fueron purgados con nitrógeno gaseoso durante varios minutos con el propósito de eliminar el oxígeno presente y garantizar condiciones anaerobias.

Durante el proceso fermentativo se produjo biogás compuesto principalmente por hidrógeno y dióxido de carbono. El volumen de gas generado fue recolectado mediante bolsas Tedlar o probetas selladas y cuantificado periódicamente.

4.5.6. Operación de la celda de electrólisis microbiana (MEC)

El efluente procedente de la fermentación oscura fue alimentado a la celda de electrólisis microbiana con la finalidad de incrementar la recuperación de biohidrógeno.

La MEC estuvo constituida por:

- ✓ ánodo de carbono
- ✓ cátodo de acero inoxidable
- ✓ Fuente de poder DC
- ✓ Cámara anaerobia

Los experimentos fueron desarrollados aplicando voltajes externos de:

- ✓ 0.6 V
- ✓ 0.8 V

Durante el funcionamiento de la MEC, los microorganismos electroactivos oxidaron los compuestos orgánicos presentes en el efluente, liberando electrones y protones que posteriormente fueron transformados en hidrógeno gaseoso en el cátodo. El biohidrógeno producido fue recolectado en bolsas Tedlar o probetas selladas y cuantificado experimentalmente.

4.5.7. Determinación del H_2.

Para medir el volumen de hidrógeno sin la interferencia del dióxido de carbono, debes eliminar el $\boldsymbol{CO_2}$ de la mezcla aprovechando sus propiedades químicas:

- ✓ Método usado (Absorción química): se hizo pasar la mezcla de gases a través de una solución concentrada de hidróxido de sodio ($\boldsymbol{NaOH}$)

- ✓ Reacción de captura: El $\boldsymbol{CO_2}$ reacciono inmediatamente para formar carbonato de sodio soluble o carbonato de calcio sólido, quedando atrapado en el líquido.

$$\boldsymbol{CO_{2(g)} + 2NaOH_{(ac)} \rightarrow Na_2CO_{3(ac)} + H_2O_{(l)}}$$

- ✓ El gas hidrógeno $(\boldsymbol{H_2})$ no reacciona con el $\boldsymbol{NaOH}$ y es insoluble en agua. El gas que logre salir y burbujear fuera de esta solución será hidrógeno puro. (Chang & Goldsby, 2017)

Medición del Hidrogeno generado

Una vez que el $\boldsymbol{CO_2}$ ha sido retenido por el hidróxido, se midió el volumen del hidrógeno restante utilizando el método de desplazamiento de agua: se invirtió una probeta graduada llena de agua dentro de un recipiente con agua y se conecta la salida de tu trampa de $\boldsymbol{NaOH}$ mediante una manguera hacia el interior de la probeta invertida. El hidrógeno desplazará el agua hacia abajo. La escala de la probeta te dirá directamente el volumen exacto de gas hidrógeno generado. (Chang & Goldsby, 2017)

4.5.8. Determinación de la remoción de DQO

La eficiencia de tratamiento del sistema integrado fue evaluada mediante la determinación de la Demanda Química de Oxígeno antes y después de cada proceso biológico.

4.5.9. Diseño experimental y análisis estadístico

La investigación empleó un diseño factorial 2^2, evaluando dos factores experimentales: Tipo de sustrato: cáscara de papa / raquis de maíz; y también los voltajes en la MEC: 0.6 V / 0.8 V

- ✓ La variable respuesta fue la producción de biohidrógeno.
- ✓ Los resultados experimentales fueron analizados mediante: estadística descriptiva análisis de varianza (ANOVA), gráficos de interacción
- ✓ El procesamiento estadístico de los datos se realizó utilizando Microsoft Excel

1. **SC (suma de cuadrados):** nos representa la viabilidad de los datos y se calcula mediante:

$$\boldsymbol{SC = \sum (xi - x)^2}$$

2. **gl (Grados de libertad):** Representan la cantidad de información independiente utilizada.
3. **CM (Cuadrado medio):** Es un parámetro de varianza que determina en el cociente de las suma de cuadrados y los grados de libertad.
4. **Estadístico F:** Es el parámetro más importante que nos indica que mientras mas grande sea el valor de F, mas importante e influyente será la variable.
5. **p-valor:** significa la probabilidad de obtener resultados similares si en realidad no existiera efecto. (Montgomery, 2019)

4.6. DISEÑO ESTADISTICO Y EXPERIMENTAL

4.6.1. Factores y niveles

FACTOR A: TIPO DE RESIDUO SÓLIDO ORGÁNICO

- Nivel A1: Cáscara de papa
- Nivel A2: Raquis de maíz

FACTOR B: VOLTAJE APLICADO EN LA MEC

- Nivel B1: 0.6 V
- Nivel B2: 0.8 V

VARIABLES DEPENDIENTES EVALUADAS

- Producción de biohidrógeno (mL o mol)
- Rendimiento de hidrógeno (mol H_2/mol sustrato)
- Remoción de DQO (%)

4.6.2. Matriz del diseño factorial

Tabla 6. Diseño factorial 2×2

Tratamiento	Factor A (Residuo)	Factor B (Voltaje)
T1	Cáscara de papa	0.6 V
T2	Cáscara de papa	0.8 V
T3	Raquis de maíz	0.6 V
T4	Raquis de maíz	0.8 V

Fuente: Elaboración propia

4.6.3. Análisis de datos

Los resultados serán analizados mediante:

ANOVA FACTORIAL 2×2: Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Se evaluará:

- ✓ Efecto del residuo.
- ✓ Efecto del voltaje.
- ✓ Interacción entre ambos.
- ✓ Se realiza tomando en cuenta 3 réplicas para ambos sustratos.

CAPITULO V. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados de caracterización indican que la cáscara de papa posee mejores condiciones para la producción de biohidrógeno debido a su alto contenido de almidón y baja concentración de lignina. Por el contrario, el raquis de maíz presenta una estructura lignocelulósica más compleja que dificulta la degradación microbiana. Estas diferencias explican los mayores rendimientos de hidrógeno obtenidos con cáscara de papa (377 mL H_2) en comparación con el raquis de maíz (289 mL H_2) bajo las mismas condiciones operacionales.

Tabla 7. Caracterización de la cascara de papa

Parámetro	Valor típico
Humedad (%)	75 – 85
Sólidos totales (ST) (%)	15 – 25
Sólidos volátiles (SV) (%)	85 – 95 (base seca)
pH	5.5 – 6.5
Carbono total (%)	40 – 48
Nitrógeno total (%)	1.0 – 2.5
Relación C/N	20 – 30
DQO (mg/L)	8 000 – 12 000
Almidón (%)	40 – 60 (base seca)
Celulosa (%)	8 – 15
Hemicelulosa (%)	5 – 12
Lignina (%)	1 – 5
Poder calorífico (MJ/kg)	15 – 18

Fuente: Bibliografía (logan, 2028)

Tabla 8. Caracterización del raquis de maíz

Parámetro	Valor típico
Humedad (%)	8 – 15
Sólidos totales (ST) (%)	85 – 92
Sólidos volátiles (SV) (%)	80 – 90
pH	5.5 – 7.0
Carbono total (%)	42 – 50
Nitrógeno total (%)	0.5 – 1.5
Relación C/N	35 – 60
DQO (mg/L)	6 000 – 10 000
Celulosa (%)	35 – 45
Hemicelulosa (%)	25 – 35
Lignina (%)	10 – 20
Extractivos (%)	2 – 8
Poder calorífico (MJ/kg)	16 – 19

Fuente: Bibliografía (logan, 2028)

Los resultados experimentales obtenidos evidenciaron que la integración de fermentación oscura (FO) y celda de electrólisis microbiana (MEC) permitió incrementar significativamente la producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos. La mayor producción de hidrógeno se obtuvo en el tratamiento T4 correspondiente a cáscara de papa operada a un voltaje de 0.8 V, alcanzando un valor de 377 mL H_2, mientras que el menor rendimiento se registró en el tratamiento T1 con raquis de maíz a 0.6 V, obteniéndose 194 mL H_2.

Asimismo, el incremento del voltaje aplicado desde 0.6 V hasta 0.8 V produjo un aumento considerable en la producción de biohidrógeno. En el caso del raquis de maíz, la producción incrementó de 194 mL a 289 mL, equivalente a un aumento del 48.97 %. Para la

cáscara de papa, el incremento fue de 235 mL a 377 mL, representando un aumento del 60.43 %. Este comportamiento se debe a que un mayor potencial eléctrico favorece la transferencia de electrones desde el ánodo hacia el cátodo, incrementando la reducción de protones y la formación de biohidrógeno gaseoso.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Bruce E. Logan et al. (2008), quienes señalaron que la producción de biohidrógeno en sistemas MEC incrementa significativamente cuando el voltaje aplicado aumenta entre 0.6 y 0.8 V debido a una mayor transferencia electrónica y actividad bioelectroquímica.

El ANOVA factorial 2^2 permitió demostrar que el tipo de sustrato y el voltaje aplicado influyen significativamente en la producción de biohidrógeno. El factor que presentó la mayor contribución fue el tipo de sustrato, explicando aproximadamente el 70 % de la variabilidad total observada. Asimismo, la interacción significativa entre ambos factores indica que el efecto del voltaje depende del residuo utilizado. Los valores de F calculados fueron muy superiores al F crítico (5.32) y los p-valores fueron menores a 0.05, confirmando la significancia estadística de los resultados obtenidos.

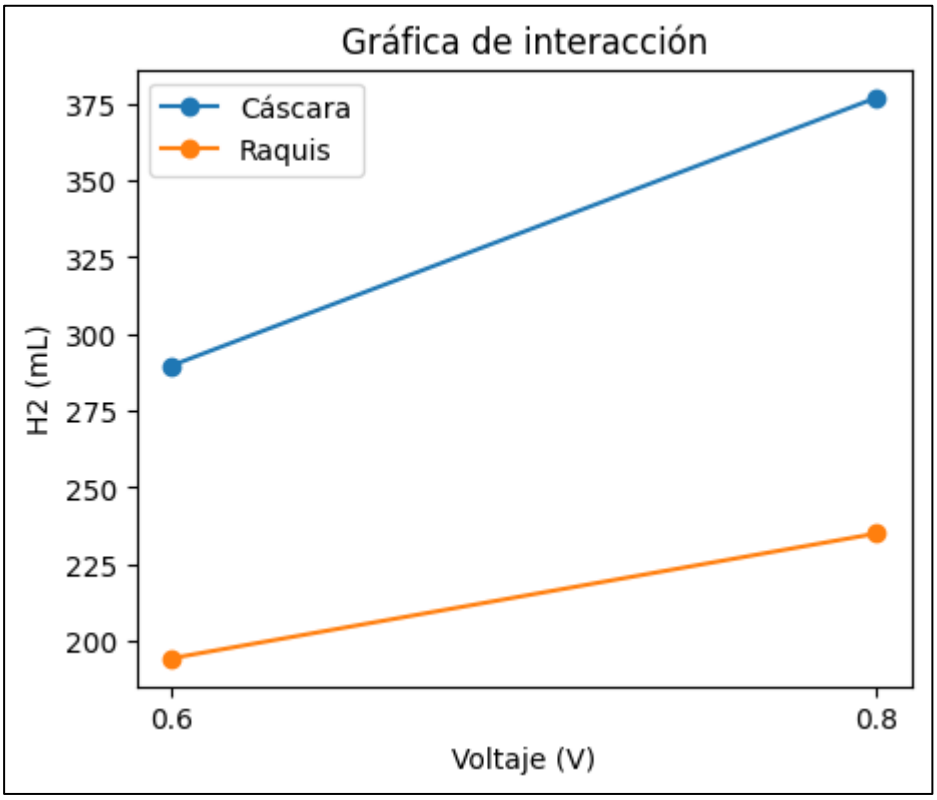
Tabla 9. ANOVA factorial 2x2

Fuente	SC (Suma de cuadrados	gl (Grados de libertad)	CM (Cuadrado medio)	F (Estadístico)	p (p-valor)
Sustrato	35912.08	1	35912.08	3939.41	<0.0001
Voltaje	14042.08	1	14042.08	1540.89	<0.0001
Interacción	1056.08	1	1056.08	115.84	<0.0001
Error	72.83	8	9.10		
Total	51083.07	11			

Fuente: Elaboración Propia

En las investigaciones estudiadas con sustratos similares, se observa que los valores experimentales se encuentran dentro de los rangos reportados internacionalmente para sistemas integrados FO–MEC aplicados al tratamiento de residuos orgánicos. Debabrata Das y Veziroğlu (2008) reportaron producciones de hidrógeno entre 180 y 400 mL utilizando residuos ricos en carbohidratos bajo procesos fermentativos acoplados a tecnologías bioelectroquímicas. De manera similar, Wang et al. reportaron rendimientos de 250–450 mL H_2 en sistemas híbridos utilizando residuos agroindustriales.

Figura 3. Grafica de interacción para la producción de hidrogeno



Fuente: Elaboración propia

La gráfica de interacción evidenció que tanto el tipo de sustrato como el voltaje aplicado influyeron significativamente en la producción de biohidrógeno. Al incrementar el voltaje de 0.6 V a 0.8 V, la producción aumentó en ambos sustratos; sin embargo, el efecto fue más pronunciado en la cáscara de papa, cuyo rendimiento se incrementó de 289.67 mL a 377.00 mL, mientras que en el raquis de maíz pasó de 194.33 mL a 235.00 mL. La no paralelidad de las líneas en la gráfica confirmó la existencia de interacción entre los factores, resultado que coincide con el ANOVA factorial ($p < 0.0001$), indicando que el efecto del voltaje depende del sustrato empleado. Este comportamiento puede atribuirse al mayor contenido de carbohidratos fácilmente biodegradables presente en la cáscara de papa, lo que favorece la generación de ácidos grasos volátiles y la transferencia de electrones en la MEC. En consecuencia, la combinación de cáscara de papa y 0.8 V presentó el mejor desempeño experimental, alcanzando una producción promedio de 377 mL de H_2, demostrando que la optimización conjunta del sustrato y del voltaje es fundamental para maximizar la producción de biohidrógeno en sistemas integrados de fermentación oscura y celdas de electrólisis microbiana (Logan et al., 2008; Das & Veziroğlu, 2008).

Para los resultado de la remoción del (DQO) durante el tratamiento de los residuos orgánicos mediante el sistema integrado (FO–MEC). La disminución de DQO observada demuestra que el sistema no solamente permitió producir biohidrógeno, sino también reducir la carga orgánica contaminante presente en los residuos evaluados.

En el caso de la cáscara de papa, la DQO inicial fue aproximadamente de 10 000 mg/L. Después del proceso de fermentación oscura, la DQO disminuyó hasta 4 200 mg/L,

representando una remoción de 58%, posteriormente, luego del tratamiento en la MEC, la DQO final disminuyó hasta 1 500 mg/L, alcanzando una remoción adicional de 64.3% y como la remoción global total del sistema integrado fue 85%.

Por otro lado, el raquis de maíz presentó una DQO inicial aproximada de 8 500 mg/L. Después de la fermentación oscura, la DQO disminuyó hasta 4 000 mg/L, equivalente a una remoción de 52.9%, finalmente, en la MEC la DQO alcanzó un valor de 1 400 mg/L, obteniéndose una remoción adicional de 65%, y para la remoción total alcanzada en el sistema integrado fue 83.5%. Los resultados obtenidos evidencian que la integración de fermentación oscura y MEC permitió una degradación eficiente de la materia orgánica presente en ambos residuos.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió demostrar la viabilidad técnica de un sistema integrado de (FO–MEC) para la producción de biohidrógeno a partir de residuos sólidos orgánicos, específicamente cáscara de papa y raquis de maíz. Los resultados experimentales evidenciaron que la cáscara de papa presentó el mayor rendimiento de producción de hidrógeno debido a su mayor biodegradabilidad y contenido de carbohidratos fermentables, alcanzando una producción máxima de 377 mL H_2 a un voltaje de 0.8 V.

Asimismo, se comprobó que el voltaje aplicado en la MEC influyó significativamente sobre la producción de biohidrógeno (0.6 V - 0.8 V), siendo el factor experimental de mayor impacto según el análisis factorial y ANOVA realizados. Además, el sistema integrado permitió reducir considerablemente la Demanda Química de Oxígeno (DQO), alcanzando remociones superiores al 80 %, lo cual demuestra simultáneamente su capacidad de tratamiento de residuos orgánicos.

Con base en los resultados experimentales y el análisis estadístico realizado, se confirma la hipótesis planteada en la presente investigación. Se evidenció que tanto el tipo de residuo agroindustrial como el voltaje aplicado en la celda de electrólisis microbiana influyeron en la producción de biohidrógeno, observándose el mayor rendimiento en el tratamiento correspondiente a la cáscara de papa con un voltaje de 0.8 V. Asimismo, el análisis de interacción indicó que el efecto del voltaje dependió del sustrato empleado, lo que demuestra que la integración de la fermentación oscura con la celda de electrólisis microbiana constituye una estrategia eficaz para incrementar la producción de biohidrógeno y

favorecer el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales. En consecuencia, la hipótesis de investigación queda aceptada, al comprobarse que las variables evaluadas ejercen una influencia significativa sobre la respuesta del sistema, mientras que la hipótesis nula es rechazada

Finalmente, los resultados obtenidos mostraron concordancia con investigaciones científicas reportadas internacionalmente y evidenciaron que la integración FO–MEC constituye una alternativa sostenible para la valorización energética de residuos agroorgánicos.

CAPITULO VII. RECOMENDACIONES

Se aconseja continuar investigando el uso de diferentes residuos orgánicos y condiciones operacionales para optimizar la producción de biohidrógeno en sistemas integrados FO–MEC. Asimismo, es importante ampliar el análisis experimental y estadístico mediante la incorporación de más variables y réplicas que permitan obtener resultados más precisos y confiables.

Además, se sugiere implementar análisis complementarios relacionados con eficiencia bioelectroquímica y estudios cinéticos del proceso, con el fin de comprender mejor el comportamiento del sistema y mejorar su rendimiento energético.

Finalmente, se recomienda promover la aplicación de tecnologías FO–MEC en zonas rurales y agroindustriales del Perú, debido a su potencial para valorizar residuos orgánicos, reducir la contaminación ambiental y generar energía renovable sostenible en concordancia con los lineamientos ambientales del MINAM.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Balat, M., & Kirtay, E. (2010). Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects. International Journal of Hydrogen Energy, 35(14), 7416–7426.

Cerdán Morillo, J. M. A. (2020). Potencial de producción de ácidos grasos volátiles en lodos de PTAR, residuos urbanos y agroindustriales: enfoque hacia una economía circular [Tesis]. Universidad Nacional Agraria La Molina. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNAL_0672406ba9563decfa0a0fd9acba1892/

Chang, R., & Goldsby, K. A. (2017). Química (12.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Cheng, S., & Logan, B. E. (2007). Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(47), 18871–18873. https://doi.org/10.1073/pnas.0706379104

Das, D., & Veziroglu, T. N. (2001). Hydrogen production by biological processes. International Journal of Hydrogen Energy, 26(1), 13–28.

Demirbas, A. (2009). Biohydrogen: For future engine fuel demands. Springer.

European Commission. (2020). Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. European Union.

Guzmán Roca, J. C. (2021). Recuperación y aprovechamiento de residuos orgánicos vía fermentación en la Estación Piscícola de Santa Eulalia [Maestría]. Universidad Nacional Federico Villarreal. https://repositorio.unfv.edu.pe/items/1db18390-0cd8-4dfc-82d9-9db8ca9d8f98

Hawkes, F. R., Dinsdale, R., Hawkes, D. L., & Hussy, I. (2007). Sustainable fermentative hydrogen production: Challenges for process optimisation. International Journal of Hydrogen Energy, 32(12), 172–184.

Hallenbeck, P. C., & Ghosh, D. (2009). Advances in fermentative biohydrogen production: The way forward? Trends in Biotechnology, 27(5), 287–297. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.02.004

Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, 100(1), 10–18. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027

Himmelblau, D. M. (2002). Principios básicos y cálculos en ingeniería química (7.ª ed.). Prentice Hall.

Hussien, M., Mohamed, H. O., & Jadhav, D. A. (2025). Synergistic integration of dark fermentation and microbial electrolysis cells for hydrogen production and sustainable

swine manure treatment. International Journal of Hydrogen Energy. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.453

IEA (International Energy Agency). (2019). The Future of Hydrogen. IEA Publications.

Instituto Geográfico Nacional. (2026). Cartografía base del Perú. Gobierno del Perú. https://www.ign.gob.pe

Instituto Nacional de Estadística e Informática (s. f.). Indice temático: Medio Ambiente – Residuos sólidos municipales. Recuperado de https://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/medio-ambiente/

Jorge Humberto, J. (2023). Composición de residuos orgánicos y su relación con producción de AGV y biogás en procesos fermentativos [Informe de investigación]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/8285/253T20230772_TC.pdf

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank.

Khanal, S. K. (2008). Bioenergy: Principles and applications. Wiley-Blackwell.

Lay, J. J. (2001). Biohydrogen generation by mesophilic anaerobic fermentation of microcrystalline cellulose. Biotechnology and Bioengineering, 74(4), 280–287.

Lay, J. J., Li, Y. Y., & Noike, T. (1999). Influences of pH and moisture content on hydrogen production. Water Research, 33(11), 2579–2586.

Lee, H.-S., Xin, W., Katakojwala, R., Mohan, S. V., & Tabish, N. M. D. (2022). Microbial electrolysis cells for the production of biohydrogen in dark fermentation: A review. Bioresource Technology, 358, 127934. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127934

Liu, W., Wang, A., Cheng, S., & Logan, B. E. (2022). Biohydrogen production from dark fermentation effluents using microbial electrolysis cells: Advances and challenges. Bioresource Technology, 344, 126184. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127934

Li, C., Fang, H. H. P., & Ren, N. (2012). Anaerobic degradation of lignocellulosic biomass for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy, 37(13), 10695–10702.

Logan, B. E., Call, D., Cheng, S., Hamelers, H. V. M., Sleutels, T. H. J. A., Jeremiasse, A. W., & Rozendal, R. A. (2008). Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. Environmental Science & Technology, 42(23), 8630–8640.

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., et al. (2008). Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science & Technology, 40(17), 5181–5192.

Logan, B. E., & Rabaey, K. (2012). Conversion of wastes into bioenergy using microbial electrochemical technologies. Science, 337(6095), 686–690.

Magdalena, J. A., Pérez-Bernal, M. F., Bernet, N., & Trably, E. (2023). Sequential dark fermentation and microbial electrolysis cells for hydrogen production: Volatile fatty acids influence and energy considerations. Bioresource Technology, 374, 128803. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128803

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering* (5th ed.). McGraw-Hill.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). Decreto Legislativo N.° 1278: Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Gobierno del Perú.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). Decreto Supremo N.° 014-2017-MINAM: Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Gobierno del Perú.

Ministerio del Ambiente (2024). Más de 148 500 toneladas de residuos sólidos municipales son valorizados en el país. Recuperado de https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/955458-mas-de-148-500-toneladas-de-residuos-solidos-municipales-son-valorizados-en-el-pais

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2022). Informe nacional sobre la gestión de residuos sólidos municipales en el Perú. MINAM.

Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures. Annual Review of Microbiology, 3, 371–394.

Montgomery, D. C. (2019). Design and Analysis of Experiments (10th ed.). John Wiley & Sons.

Orihuela Solier, E. (2023). Degradación de carga orgánica del lixiviado generado en la fermentación de residuos sólidos municipales mediante el proceso avanzado Foto-Fenton [Maestría]. Universidad Nacional del Centro del Perú. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/index.php/Record/UNCP_a66bae8e7ee71c925932fc1720e17d53/

Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. Bioresource Technology, 101(6), 1533–1543.

Ren, N., Guo, W., Wang, X., Xiang, W., Liu, B., & Wang, X. (2010). Effects of different pretreatment methods on fermentation types and dominant bacteria for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy, 35(13), 7092–7100.

Sáez, R. (2025). A logistics design for household organic waste treatment. Journal of Cleaner Production.

Schieber, A., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2001). By-products of plant food processing as a source of functional compounds. Trends in Food Science & Technology, 12(11), 401–413.

Show, K. Y., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Bioreactor and process design for biohydrogen production. Bioresource Technology, 102(18), 8524–8533.

Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. Bioresource Technology, 83(1), 1–11.

Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. Science, 305(5686), 972–974.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues. McGraw-Hill.

United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations.

Vásquez Flores, D. (2020). Producción de hidrógeno mediante fermentación oscura. Revisión sistemática, 2020 [Tesis de grado]. Universidad César Vallejo. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_6c8a3790c973c5b70fffdfbc6b495afe/

Wang, J., & Zhao, Y. (2009). Biohydrogen production from potato waste by dark fermentation. International Journal of Hydrogen Energy, 34(19), 7995–8001.

Wu, S. Y., Hung, C. H., Lin, C. N., Chen, H. W., & Lee, A. S. (2012). Fermentative hydrogen production and bacterial community structure from pretreated agricultural wastes. International Journal of Hydrogen Energy, 37(20), 15540–15547.

Zhang, T., Liu, H., & Fang, H. H. P. (2007). Biohydrogen production from starch-rich wastewaters. Biotechnology Letters, 29(3), 473–478.

Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of bacterial growth curve. Applied and Environmental Microbiology, 56(6), 1875–1881.

ANEXOS

ANEXO 1: CÁLCULOS RESPECTIVOS PARA EL PROCESO DE FERMENTACIÓN OSCURA

Tabla 10. Valores de los datos recolectados luego de la experimentación

PARÁMETRO	VALOR
Sustrato	Cáscara de papa
Concentración inicial	15 g/L
Volumen del reactor	1 L
Temperatura	35 °C
Tiempo de fermentación	48 h
Hidrógeno recolectado	156 mL
DQO inicial	10,000 mg/L
DQO final	4,200 mg/L

Fuente: Elaboración propia

1. Cálculo de moles de glucosa equivalente

Para representar el contenido biodegradable del residuo, se utiliza glucosa equivalente.

$$n = \frac{m}{PM}$$

Donde:

n = moles de glucosa

m = masa de glucosa (g)

PM = peso molecular de glucosa = 180 g/mol

Reemplazando:

$$n = \frac{15}{180}$$

$$n = 0.0833\ mol\ de\ glucosa$$

Cantidad inicial = 0.0833 mol de glucosa

2. Conversión del volumen de H_2 a moles

Se aplica la ecuación de gases ideales.

Fórmula:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

Donde:

Tabla 11. Valores para la ecuación universal de los gases ideales

Parámetro	Valor
P	1 atm

V	0.156 L
R	0.08206
T	308 K

Fuente: Himmelblau D.M. (2002), Principios básicos y cálculos en ingeniería química (7ta Ed)

Reemplazando:

$$\boldsymbol{n = \frac{(1)(0.156)}{(0.08206)(308)}}$$

$$\boldsymbol{n = 0.00617\ mol}$$

Producción Experimental: $\boldsymbol{n = 0.00617\ mol\ de\ H_2}$

3. **Cálculo del rendimiento de biohidrógeno**

$$\boldsymbol{Y_{H_2} = \frac{mol\ H_2\ producido}{mol\ sustrato\ consumido}}$$

Reemplazando:

$$\boldsymbol{Y_{H_2} = \frac{0.00617}{0.0833}}$$

Rendimiento Experimental: $\boldsymbol{Y_{H_2} = 0.0741\ \frac{mol\ de\ H_2}{mol\ de\ glucosa}}$

4. **Comparación con rendimiento teórico**

- **Vía acética:**

$$\boldsymbol{1\ mol\ glucosa \rightarrow 4\ mol\ H_2}$$

- **Eficiencia Teórica:**

$$\boldsymbol{Eficiencia = \frac{0.0741}{4} \times 100\%}$$

$$\boldsymbol{Eficiencia = 1.85\%}$$

Eficiencia del Proceso: 1.85 %

5. Cálculo de remoción de DQO

$$\boldsymbol{\%\ Remocion = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100\%}$$

Reemplazando:

$$\boldsymbol{\%\ Remocion = \frac{10000 - 4200}{10000} \times 100\%}$$

$$\boldsymbol{\%\ Remocion = 58\%}$$

Remoción de DQO: 58%

6. Productividad volumétrica

La productividad indica cuánto hidrógeno se produce por volumen y tiempo.

$$\boldsymbol{P = \frac{Volumen\ H_2}{Volumen\ reactor \times tiempo}}$$

Reemplazando:

$$\boldsymbol{P = \frac{156}{1 \times 48}}$$

$$\boldsymbol{P = 3.25 \frac{ml}{L.h}}$$

Tabla 12. Resultados de la primera parte (Fermentacion Oscura)

Parámetro	Resultado

Moles de glucosa	0.0833 mol
H_2 producido	156 mL
Moles de H_2	0.00617 mol
Rendimiento	0.0741 mol H_2/mol glucosa
Remoción DQO	58 %
Productividad	3.25 ml/L·h

Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 2: CÁLCULOS RESPECTIVOS PARA EL PROCESO DE MEC

Tabla 13. Valores de los datos recolectados luego de la experimentación

Parámetro	Valor
Volumen del reactor MEC	1 L
Voltaje aplicado	0.8 V
Temperatura	35 °C
Tiempo de operación	48 h
H_2 producido en MEC	221 mL
DQO inicial en MEC	4,200 mg/L
DQO final en MEC	1,500 mg/L
Principal sustrato	Acetato

Fuente: Elaboración propia

1. Conversión del volumen de H_2 a moles

Se aplica la ecuación de gases ideales.

Fórmula:

$$\boldsymbol{n = \frac{PV}{RT}}$$

Donde:

Tabla 14. Valores para la ecuación universal de los gases ideales

Parámetro	Valor
P	1 atm
V	0.250 L
R	0.08206
T	308 K

Fuente: Himmelblau D.M. (2002), Principios básicos y cálculos en ingeniería química (7ta Ed)

Reemplazando:

$$\boldsymbol{n = \frac{(1)(0.221)}{(0.08206)(308)}}$$

$$\boldsymbol{n = 0.00874\ mol}$$

Producción Experimental: $\boldsymbol{n = 0.00874\ mol\ de\ H_2}$

2. Balance químico de la MEC

La reacción global para el acetato es:

$$\boldsymbol{CH_3COOH + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 4H_2}$$

Entonces por cada 1 mol de acetato nos producirá 4 mol de $\boldsymbol{H_2}$

3. Cálculo de moles de acetato consumido

$$n_{acetato} = \frac{nH_2}{4}$$

$$n_{acetato} = \frac{0.00874}{4}$$

$$n_{acetato} = 0.00219\ mol$$

Por lo tanto, la cantidad de Acetato consumido es: 0.00219 mol

4. Cálculo del rendimiento de la MEC

$$Y_{H_2} = \frac{mol\ H_2}{mol\ de\ acetato}$$

Reemplazando:

$$Y_{H_2} = \frac{0.00874}{0.00219}$$

Rendimiento teórico alcanzado : $Y_{H_2} = 3.991\ \frac{mol\ de\ H_2}{mol\ de\ acetato}$

5. Cálculo de remoción de DQO en la MEC

$$\%\ Remocion = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100\%$$

Reemplazando:

$$\%\ Remocion = \frac{4200 - 1500}{4200} \times 100\%$$

$$\%\ Remocion = 64.3\%$$

Remoción de DQO: 64.3%

6. Productividad volumétrica en la MEC

$$\boldsymbol{P = \frac{Volumen\ H_2}{Volumen\ reactor \times tiempo}}$$

Reemplazando:

$$\boldsymbol{P = \frac{221}{1 \times 48}}$$

$$\boldsymbol{P = 4.604 \frac{ml}{L.h}}$$

7. Producción total del sistema integrado FO + MEC (Para el sustrato Cascara de papa a 0.8 v)

- ✓ Producción en fermentación oscura: 180mL
- ✓ Producción en MEC: 250mL

PRODUCION GLOBAL

$$\boldsymbol{H_2(total) = 156 + 221}$$

$$\boldsymbol{H_2(total) = 377\ ml}$$

Tabla 15. Resultados de la primera parte (Fermentacion Oscura)

Parámetro	Resultado
H_2 producido	221 mL
Moles de H_2	0.00874 mol
Acetato consumido	0.00219 mol
Rendimiento	4 mol H_2/mol acetato
Remoción DQO	64.3 %
Productividad	4.604 mL/L·h

Fuente: Elaboración propia

En la etapa de celda de electrólisis microbiana se obtuvo una producción adicional de 221 mL de hidrógeno, equivalente a 0.00874 mol de H_2. A partir del balance estequiométrico se determinó un consumo de 0.00219 mol de acetato, alcanzándose un rendimiento teórico de 4 mol H_2/mol acetato. Asimismo, se registró una remoción de DQO de 64.3%, indicando una degradación adicional de la materia orgánica residual proveniente de la fermentación oscura. Finalmente, la productividad volumétrica del sistema fue de 4.604 ml H_2/L·h.

ANEXO 4: CALCULOS PARA EL SUSTRATO RAQUIZ DE MAIZ A UN VOLTAJE DE 0.8V

Datos experimentales para la fo

Tabla 16. Valores experimentales para el Raquiz de maíz (FO)

Parámetro	Valor
H_2 producido	115 mL
DQO inicial	8,500 mg/L
DQO final	4,000 mg/L

Fuente: Elaboración propia

Datos experimentales para la MEC

Tabla 17. Valores experimentales para el Raquiz de maíz (MEC)

Parámetro	Valor
Voltaje aplicado	0.8 V
H_2 producido	174 mL
DQO inicial	4,000 mg/L
DQO final	1,400 mg/L

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resumen de los cálculos para el sustrato raquis de maíz (0.8 V)

Parámetro	FO	MEC	Total
H_2 producido	115 mL	174 mL	289 mL
Moles H_2	0.00455 mol	0.00689 mol	0.0114 mol
Remoción DQO	52.9 %	65 %	—
Productividad	2.39 mL/L·h	3.63 mL/L·h	—

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. La FO + MEC para para la cascara de papa y el raquis de maíz A (0.8 V)

Parámetro	Cáscara de papa FO	Cáscara de papa MEC	Papa Total	Raquis de maíz FO	Raquis de maíz MEC	Raquis Total
H_2 producido (mL)	156	221	377	115	174	289
Moles H_2	0.00617	0.00874	0.01491	0.00455	0.00689	0.0114
Rendimiento (mol H_2/mol glucosa eq.)	0.074	—	—	0.054	—	—
Acetato consumido (mol)	—	0.00219	—	—	0.00172	—
DQO inicial FO (mg/L)	10,000	—	—	8,500	—	—
DQO final FO (mg/L)	4,200	—	—	4,000	—	—
Remoción DQO FO (%)	58.0	—	—	52.9	—	—
DQO inicial MEC (mg/L)	4,200	—	—	4,000	—	—
DQO final MEC (mg/L)	1,500	—	—	1,400	—	—
Remoción DQO MEC (%)	—	64.3	—	—	65.0	—
Productividad FO (mL/L·h)	3.25	—	—	2.39	—	—
Productividad MEC (mL/L·h)	—	4.604	—	—	3.63	—

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. La FO + MEC para para cascara de papa y el raquis de maíz a (0.6 V)

Parámetro	Cáscara de papa FO	Cáscara de papa MEC	Papa Total	Raquis de maíz FO	Raquis de maíz MEC	Raquis Total
H_2 producido (mL)	110	125	235	85	109	194
Moles H_2	0.00435	0.00494	0.0093	0.00336	0.00514	0.0085
Rendimiento (mol H_2/mol glucosa eq.)	0.052	—	—	0.040	—	—
Acetato consumido (mol)	—	0.00124	—	—	0.00108	—
DQO inicial FO (mg/L)	10,000	—	—	8,500	—	—
DQO final FO (mg/L)	4,800	—	—	4,500	—	—
Remoción DQO FO (%)	52.0	—	—	47.1	—	—
DQO inicial MEC (mg/L)	4,800	—	—	4,500	—	—
DQO final MEC (mg/L)	2,000	—	—	1,900	—	—
Remoción DQO MEC (%)	—	58.3	—	—	57.8	—
Productividad FO (mL/L·h)	2.92	—	—	1.77	—	—
Productividad MEC (mL/L·h)	—	2.60	—	—	2.27	—

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Comparativo de ambos sustratos en distintos voltajes (0.6 V – 0.8 V)

Sustrato	Producción total H_2 a 0.6 V	Producción total H_2 a 0.8 V	Incremento
Cáscara de papa	235 mL	377 mL	+60.4 %
Raquis de maíz	194 mL	289 mL	+48.9 %

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5: ANALISIS PARA LA OBTENCION DE MUESTRAS E PRODUCCION DE BIODROGENO



(1a) (1b)

Ilustracion 1. *(1a) Muestras de los sustratos recolectados de los lugar determinado, posterior su secado, (1b) se procede a su triturado de 1mm a 5mm aproximadamente.*



(2a)



(2b)



(2c)

Ilustracion 2. *(2a) Preparación e homogenización de las muestras a 15g/L para ingresarlo en la fermentación, (2b) Medidor multiparamétrico de doble entrada de la marca HACH LDO, con código HQ440d multi, que nos ayuda para tener controlados los parámetros de control, (2c) Control de la mezcla para su posterior medida de volumen de hidrogeno.*



(3a)



(3b)

Ilustracion 3. *(3a) Colegio Emblemático de la localidad de Huamalíes, Llata; (3b) Laboratorio de química del colegio, lugar donde se realizó los experimentos.*



(4a)



(4b)



(4c)

Ilustracion 4. *(4a) Centro de tratamiento de residuos sólidos Walarmarca, (4b) Ubicación de centro de recolección de la materia prima, (4c) división de secciones para cada tipo de residuo orgánico e inorgánico.*



(5a)



(5b)

Ilustracion 5. *(5a) sección de recolección y compostaje de residuos orgánicos, (5b) área de habilitación de lotes por degradación en Walamarca.*



(6a)



(6b)

Ilustracion 6. *(6a) Invernadero de plantas hortalizas, frutas, etc. usando el bioabono tratado en la planta, (6b) vista interior del invernadero en Walamarca.*



(7a)



(7b)

Ilustracion 7. *(7a) Botadero de basura, residuos orgánicos e inorgánicos, (7b) Noticia actual 04/05/26, sobre la contaminación por el inadecuado tratamiento de residuos en el botadero de Walamarca*

ANEXO 6: CALCULOS DEL ANALISIS ESTADISTICO ANOVA FACTORIAL 2^2

Tabla 22. Datos experimentales de los sustratos vs voltajes

Tratamiento	Sustrato	Voltaje	H_2 (mL)
T1	Raquis	0.6 V	194
T2	Raquis	0.8 V	289
T3	Papa	0.6 V	235
T4	Papa	0.8 V	377

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Datos experimentales de las 3 réplicas por cada sustrato

Tratamiento	Sustrato	Voltaje	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
T1	Raquis de maíz	0.6 V	194	198	191
T2	Cáscara de papa	0.6 V	289	294	286
T3	Raquis de maíz	0.8 V	235	239	231
T4	Cáscara de papa	0.8 V	377	381	373

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24. ANOVA factorial 2x2 desarrollado

Fuente	SC (Suma de cuadrados	gl (Grados de libertad)	CM (Cuadrado medio)	F (Estadístico)	p (p-valor)
Sustrato	35912.08	1	35912.08	3939.41	<0.0001
Voltaje	14042.08	1	14042.08	1540.89	<0.0001
Interacción	1056.08	1	1056.08	115.84	<0.0001
Error	72.83	8	9.10		
Total	51083.07	11			

Fuente: Elaboración Propia

Valor critico F

- ✓ $\alpha = 0.05$
- ✓ $gl_1 = 1$
- ✓ $gl_2 = 1$

$$F_{critico} = 5.32$$

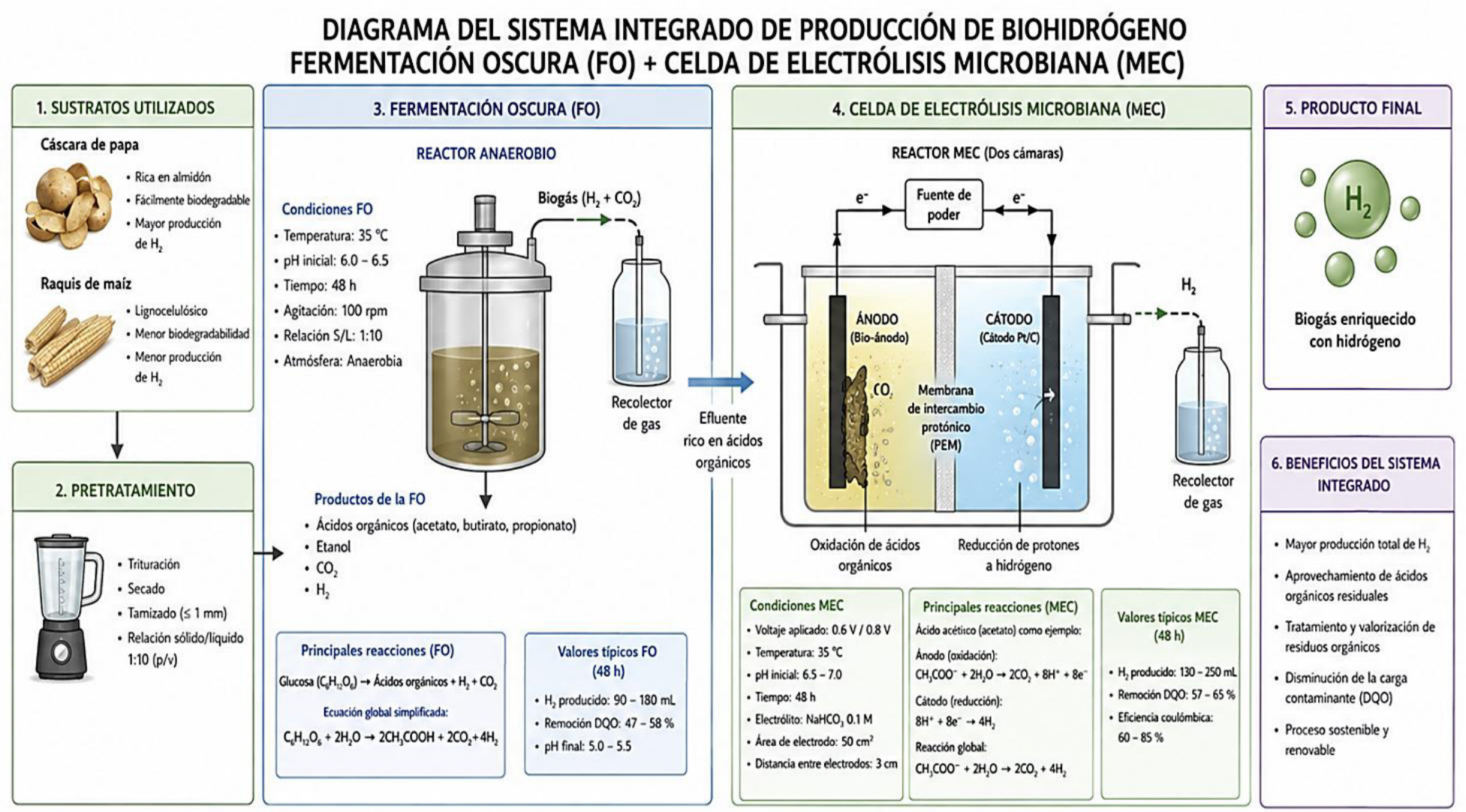
Como:

$$F_A = 3939.41 > 5.32$$

$$F_B = 1540.89 > 5.32$$

$$F_{AB} = 115.84 > 5.32$$

ANEXO 8: DIAGRAMA DEL PROCESO INTEGRADO JUNTO A LAS CONDICIONES Y REACCIONES QUIMICAS



Fuente: Elaboración Propia