

**ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
ABSORCIÓN-DIFUSIÓN CON DIFERENTES FUENTES DE CALOR**



ING. JESÚS DAVID RHENALS JULIO

MESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍA RENOVABLE

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

BARRANQUILLA-COLOMBIA

2021

**ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
ABSORCIÓN-DIFUSIÓN CON DIFERENTES FUENTES DE CALOR**

ING. JESÚS DAVID RHENALS JULIO

**Trabajo presentado para optar al Título de Magister en Eficiencia Energética y Energía
Renovable en modalidad de investigación.**

DIRECTORES

**ING. ALEXIS SAGASTUME GUTIERREZ, Ph.D
ING. JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO, Ph.D**

MESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍA RENOVABLE

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

BARRANQUILLA-COLOMBIA

2021

Nota de aceptación

ALEXIS SAGASTUME GUTIERREZ

Director

Jurado

Jurado

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

La Universidad de Córdoba como fuente de financiación, en el marco de la Convocatoria Interna de proyectos de investigación enmarcada en la sostenibilidad de los grupos de investigación año 2017, Acta No. FI-05-17 de 2019.

Mi familia y amigos que siempre me han brindado su apoyo incondicional y han sido una voz de aliento en este camino.

Los ingenieros Alexis Sagastume y Jorge Mendoza por su valiosa orientación en la realización de este trabajo y sobre todo por su gran aporte a mí proceso de formación.

El departamento de Energías de la Universidad de la Costa y a su equipo docente quienes siempre me incentivaron en el desarrollo de este trabajo.

El grupo de investigación OPUREB de la Universidad Pontificia Bolivariana quienes fueron un aliado clave facilitándonos los espacios y aportando información valiosa.

Resumen

En el presente trabajo se realiza una evaluación energética y exergética de un sistema de refrigeración por absorción-difusión funcionando con fuentes de energía renovables, las fuentes evaluadas fueron; energía solar fotovoltaica, biogás obtenido de contenido ruminal y gas de gasificación de residuos del maíz, las cuales tienen un alto potencial en el departamento de Córdoba. Inicialmente se realizó una caracterización energética de las fuentes estudiadas, para el biogás y el gas de gasificación se determinaron las características termoquímicas de las biomásas y la composición y poder calorífico del gas combustible, obteniendo valores de poder calorífico inferior de 30 MJ/kg para el biogás y 5,18 MJ/kg para el gas de gasificación. Para la energía solar por medio de un modelo gaussiano para la radiación horaria se estimaron las horas de funcionamiento del sistema de refrigeración operando con esta fuente, obtenido un tiempo de funcionamiento entre 6,5 y 7,56 horas por día. Posteriormente se realizó el análisis energético y exergético del sistema, calculando los coeficientes de desempeño con cada fuente de energía, el biogás mostró un coeficiente de desempeño de 0,18 en energía y de 0,2 en exergía, por su parte la energía solar presentó un desempeño de 0,095 en energía y 0,0065 en exergía y el gas de gasificación tuvo un desempeño de 0,06 en energía y 0,022 en exergía. Finalmente, del análisis económico del sistema se obtuvo que la fuente que presenta los menores costos de operación es la energía solar fotovoltaica, por lo que se recomienda el uso de esta fuente para refrigeración en zonas no interconectadas del departamento.

Palabras clave: Energías renovables, refrigeración, exergía, absorción-difusión; Biomasa, radiación solar.

Abstract

In this work an energetic and exergetic evaluation of an absorption-diffusion refrigeration system operating with renewable energy sources is performed, the sources evaluated were photovoltaic solar energy, biogas obtained from rumen content, and gasification gas from corn residues, which have a high potential in the department of Cordoba. Initially, an energetic characterization of the studied sources was carried out; for biogas and gasification gas, the thermochemical characteristics of the biomasses and the composition and calorific value of the fuel gas were determined, obtaining lower calorific values of 30 MJ/kg for biogas and 5,18 MJ/kg for gasification gas. In the case of solar energy, using a Gaussian model for hourly radiation, the operating hours of the refrigeration system operating with this source were estimated, obtaining an operating time between 6.5 and 7.56 hours per day. Subsequently, the energy and exergy analysis of the system was carried out, calculating the performance coefficients with each energy source; biogas showed a performance coefficient of 0,18 in energy and 0,2 in exergy, while solar energy had a performance of 0,095 in energy and 0,0065 in exergy, and gasification gas had a performance of 0,06 in energy and 0,022 in exergy. Finally, the economic analysis of the system showed that the source with the lowest operating costs is photovoltaic solar energy, so the use of this source is recommended for cooling in non-interconnected areas of the department.

Keywords: Renewable energies, cooling, exergy, absorption-diffusion; Biomass, solar radiation.

Contenido

Lista de tablas y figuras.....	10
Lista de símbolos.....	13
Capítulo I: Contexto.....	17
1. Introducción.....	17
2. Justificación.....	19
3. Objetivos.....	21
3.1. General.....	21
3.2. Específicos.....	21
Capítulo II: Revisión de la literatura.....	22
4. Refrigeración por absorción.....	22
4.1. Ciclo de refrigeración por absorción de medio ciclo.....	24
4.2. Ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto.....	25
4.3. Ciclo de refrigeración por absorción de triple efecto.....	26
4.4. Ciclo de refrigeración por absorción-difusión.....	28
4.5. Fluido de trabajo para la refrigeración por absorción.....	29
4.6. Coeficiente de desempeño (COP).....	31
5. La biomasa como fuente de energía.....	32
5.1. Caracterización energética de la biomasa.....	33
5.2. Fuente de biomasa.....	35

5.3. Gasificación de biomasa.....	36
5.4. Biodigestión de materia orgánica	40
6. Energía solar fotovoltaica.....	41
6.1. Potencial de energía solar en Córdoba.	42
7. Estado del arte	45
Capítulo III: Materiales y métodos	51
8. Caracterización de las fuentes de energía	51
8.1. Caracterización de la biomasa.	52
8.2. Caracterización de la energía solar.	53
9. Obtención de combustibles gaseosos	55
9.1. Proceso de digestión anaerobia.....	55
9.2. Proceso de gasificación	56
10. Sistema de refrigeración.....	58
10.1. Montaje experimental	60
11. Análisis energético del sistema de refrigeración.....	61
12. Análisis exergético del sistema de integración refrigerador-fuente de calor	64
13. Análisis económico	67
Capítulo IV: Resultados y discusiones	70
14. Caracterización de las fuentes de energía	70
14.1. Caracterización de las biomásas	70

14.2. Caracterización de la energía solar	72
15. Obtención de combustibles gaseosos	74
15.1. Biodigestión de contenido ruminal.....	74
15.2. Gasificación de tusa de maíz	76
16. Experimentos con el equipo de refrigeración de absorción-difusión.....	77
17. Análisis exergético del sistema	80
18. Análisis económico de la refrigeración por absorción-difusión	82
19. Conclusiones	86
20. Recomendaciones.....	87
Referencias	88
Anexos	100
Anexo I: Resultados del análisis de cromatografía de gases de gasificación.....	100
Anexo II: Resultados del análisis de cromatografía de gases de biodigestión.....	101
Anexo III: Registro fotográfico de los experimentos.....	102

Lista de tablas y figuras**Tablas**

Tabla 1. Característica de algunas mezclas refrigerantes.	30
Tabla 2: Porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina en la biomasa vegetal.....	33
Tabla 3. Variaciones del poder calorífico del syngas según el agente gasificante.	37
Tabla 4. Reacciones químicas del proceso de gasificación de biomasa	39
Tabla 5. Composición de gas de biodigestión	40
Tabla 6. Eficiencias de los paneles solares en función del semiconductor utilizado.....	42
Tabla 7. Valores de irradiación promedio para diferentes regiones del país	43
Tabla 8. Estándares para la realización de análisis próximo y elemental.	53
Tabla 9. Características técnicas del panel solar.....	54
Tabla 10. Condiciones del proceso de gasificación	57
Tabla 11. Características técnicas del equipo de refrigeración.....	58
Tabla 12. Balance de energía y masa en cada elemento	63
Tabla 13. Ecuaciones consideradas para la estimación de costo de los equipos	67
Tabla 14. Resultados de análisis próximo de las biomosas.....	70
Tabla 15. Resultados de análisis elemental de las biomosas.....	71
Tabla 16. Composición del biogás obtenido.....	75
Tabla 17. Coeficiente de desempeño exergético para cada fuente.	81
Tabla 18. Costos de los equipos del sistema de integración energética.....	82
Tabla 19. Variaciones de los costos para diferentes capacidades de refrigeración del sistema	84

Figuras

Figura 1. Ciclo de refrigeración por absorción de calor.	23
Figura 2. Ciclo de refrigeración por absorción de medio ciclo	25
Figura 3. Ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto.....	26
Figura 4. Ciclo de refrigeración por absorción de triple efecto	27
Figura 5. Ciclo de refrigeración por absorción-difusión.....	29
Figura 6: Diagrama de Van Krevelen.....	32
Figura 7. Distribución de los productos generados en el cultivo de maíz.	36
Figura 8. Panel solar.	41
Figura 9. Distribución espacial del brillo solar anual del departamento de Córdoba.	44
Figura 10. Contorno de radiación global anual del departamento de Córdoba.	45
Figura 11. Distribución de palabras claves usadas en la literatura.	49
Figura 12. Red de asociación de co-palabras.....	50
Figura 13. (a) Rumen fresco para biodigestión. (b) Tusa de maíz para gasificación	52
Figura 14. Reactor de biodigestión utilizado	55
Figura 15. Cromatógrafo de gases utilizado, laboratorio de energías renovables UPB	56
Figura 16. Microgasificador de dos zonas	57
Figura 17. (a)Puntos de medición de temperatura en el refrigerador. (b) Ciclo de refrigeración por absorción-difusión analizado.....	59
Figura 18. Montaje experimental general.	61
Figura 19. Radiación promedio día de Montería en todos los meses	72
Figura 20. Irradiación horaria promedio durante todo el año (Montería).....	73
Figura 21. Irradiación horaria promedio mensual (Montería)	74

Figura 22. Variación en el tiempo de la temperatura y presión de biodigestión.	75
Figura 23. Composición de gas y poder calorífico vs flujo de biomasa en zona de combustión.	76
Figura 24. Calor aportado en el generador por cada fuente de energía.	77
Figura 25. Calor extraído en el evaporador para cada fuente de energía.....	78
Figura 26. Coeficiente de desempeño del equipo con cada fuente de energía	78
Figura 27. Coeficiente de desempeño, calor extraído en el evaporador y calor aportado en el generador para cada fuente de energía.....	79
Figura 28. Exergía destruida en los elementos para cada fuente de energía	80
Figura 29. Costos de operación del sistema para cada una de las fuentes de energía	83

Lista de símbolos

Abreviatura	Descripción
ZNI	Zonas no interconectadas
SIN	Sistema interconectado nacional
PCO	Pesos colombianos
DNP	Departamento Nacional de Planeación
FC	Carbono fijo
VM	Material volátil
MC	Contenido de humedad
A	Cenizas
ASTM	American Society for Testing Materials
GLP	gas licuado de petróleo
UPME	Unidad de planeación minero-energética
ISO	International Organization for Standardization
Fenalce	Federación nacional de cultivadores de cereales y leguminosas
HHV	Poder calorífico superior
LHV	Poder calorífico inferior
% p/p	Fracción en peso de un componente
% HR	Porcentaje de humedad
M_i	Peso molecular del componente i
CH_4	Metano
H_2	Hidrógeno
CO_2	Dióxido de carbono
O_2	Oxígeno
H^+	Ion de hidrógeno
CH_mO_n	Fórmula estandarizada de los carbohidratos

C	Carbono
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
LiBr	bromuro de litio
MMA	Monometolamina
N	Nitrógeno
S	Azufre
kW	Kilovatio
Kg	Kilogramo
COP	Pesos colombianos
Ton	Toneladas
H	Hora
kJ	Kilojulio
°C	Grados centígrados
kPa	Kilopascales
Nmbrom ³	Metros cúbicos en condiciones normales
MJ	Megajulio
G	Gramos
MW	Megavattios
Kmol	Kilomoles
Q _t	Calor que extrae el evaporador
T _e	Temperatura de refrigeración
Q _s	Calor que logra suministrar el generador
T _g	Temperatura a la cual este genera
P _{refrigerador}	Potencia del refrigerador
η _{panel}	Eficiencia del panel
Area _{panel}	Área del panel

P_{max}	Potencia máxima
I_{mp}	Corriente de potencia máxima
V_{mp}	Voltaje de potencia máxima
I_{sc}	Corriente de corto circuito
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto
V_{pc}	Voltaje máximo del sistema
\dot{m}_i	Flujo másico del componente i
\dot{m}_{comb}	Flujo másico del combustible
LHV_{comb}	Poder calorífico inferior del combustible
Q_{abs}	Calor del absorbedor
Q_{gen}	Calor del generador
Q_{comb}	Calor de combustión
Q_{cond}	Calor del condensador
Q_{eva}	Calor del evaporador
H	Entalpía
H	Eficiencia
b_i	Exergía del componente i
b_i^{ph}	Exergía física del componente i
b_i^{ch}	Exergía química del componente i
h_0	Entalpía del estado de referencia
h_i	Entalpía del componente i
s_0	Entropía del estado de referencia
s_i	Entropía del componente i
T_0	Temperatura del estado de referencia
Φ	Factor de exergía química
\bar{R}	Constante universal de los gases ideales
Ψ_j	Exergía destruida

W_j	Flujo de trabajo j
I_j	Irradiancia j
Q_{ref}	Calor de refrigeración
COP_{ex}	Coficiente de desempeño exergético
$B_{entrada}$	Exergía de entrada
Z_{dig}	Costo del biodigestor
V_{dig}	Volumen del biodigestor
Z_{gas}	Costo del gasificador
$\dot{m}_{biomasa}$	Flujo másico de biomasa
Z_{kit}	Costo de kit solar fotovoltaico
n_{celdas}	Numero de celdas fotovoltaicas
Z_{glp}	Costo de cilindro de GLP
m_{glp}	Masa de GLP
Z_{ref}	Costo del refrigerador
Q_{ref}^n	Capacidad de refrigeración
a	Constante de costo
b	Constante de costo
γ	Factor de operación y mantenimiento
ε	Amortización
τ	Factor de distribución
N	Número de horas de operación por año
n	Tiempo de vida útil
i_0	Tasa de interés
C_m	costo de las materias primas
CO	Costo ponderado de operación e inversión
Z_K	Costo de equipos
x_i	Fracción en masa

Capítulo I: Contexto

1. Introducción

En la actualidad debido al cambio climático y a la naturaleza no renovable de los combustibles fósiles se ha concentrado la atención en proyectos que busquen el ahorro de los recursos y la mitigación del impacto ambiental. Este nuevo contexto plantea retos para los investigadores, entre los cuales se destaca el desarrollo de tecnologías competitivas técnica y económicamente. Particularmente en Colombia se tiene la necesidad de diversificar esta matriz energética y de solventar las necesidades de energía eléctrica de los habitantes que actualmente no cuentan con este servicio (López et al., 2020).

Los equipos de refrigeración convencionales requieren cantidades significativas de energía, para su funcionamiento, consumiendo alrededor de la quinta parte de la energía eléctrica generada en el mundo (Nikbakhti et al., 2020). Esto ha llevado a que se exploren alternativas para sustituir los sistemas convencionales de refrigeración, siendo el ciclo de absorción una de las tecnologías más interesantes, ya que puede ser accionado por fuentes de energía térmica de baja potencia, permitiendo así la integración con fuentes de energía renovables y aprovechamiento de calores residuales (Amaris et al., 2018).

A nivel mundial se desperdician 1.300 billones de toneladas en comida (equivalentes al 33% de los alimentos producidos) (Fao, 2012). El 23% de las pérdidas se da por problemas de almacenamiento, lo que equivale a 98,67 billones en toneladas de comida. Específicamente, en Colombia se desperdician 9,76 millones de toneladas, que equivale al 34% en la oferta nacional alimenticia (DNP Colombia, 2016). En particular, la pérdida postcosecha y durante el

almacenamiento representa el 19,8% de las pérdidas totales, mayormente por almacenamiento inadecuado producto de deficiencias en la cadena de frío.

Por otra lado las zonas no interconectadas (ZNI) representan aproximadamente el 52% del territorio colombiano, y su población se estima en 1.900.000 habitantes (Superservicios 2017). En el departamento de Córdoba el índice de cobertura de energía eléctrica es del 90,95%, mientras que en zonas rurales se reduce al 80,38% (SIEL, 2018). Estas regiones presentan alta productividad agrícola, pero debido al limitado acceso a la energía no es posible utilizar sistemas de refrigeración que les permitan conservar sus productos.

Córdoba es un departamento que además de tener muy buen potencial de energía de biomasa (Sagastume et al., 2021), también cuenta con un potencial de energía solar significativo, con una radiación promedio de 4,5 kWh/m² y altas horas de radiación anual (IDEAM, 2020). Por lo que las alternativas de refrigeración integradas con estas fuentes de energías renovables precisan ser estudiadas desde el punto de vista técnico y económico, para encontrar oportunidades de desarrollo en estas regiones.

2. Justificación

En Colombia el sistema interconectado nacional (SIN) abarca el 48% del territorio, donde habita el 96% de la población colombiana, garantizando una cobertura eléctrica del 96,38% (SIEL, 2017). En las zonas no interconectadas (ZNI), la cobertura varía entre el 45 y 77%, y se caracteriza por un servicio costoso y de mala calidad (IPSE, 2020). Los indicadores de horas promedio de prestación de servicio (entre 4 y 8 horas por día en zonas no interconectadas) y el costo promedio de la electricidad (1200 COP por kWh) evidencian los problemas del servicio eléctrico en la zona no interconectada (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2016).

El departamento de Córdoba presenta altos potenciales de aprovechamiento de energía solar y biomasas, debido a su ubicación geográfica y a su intensa actividad agrícola y pecuaria (OPUREB&DANM, 2016). Según la secretaría de desarrollo económico los productos agrícolas que más se producen en las localidades aisladas son maíz, arroz y plátano (Secretaría de desarrollo económico de Córdoba, 2018). El maíz presenta un potencial energético importante por la generación de biomasa residual como la tusa de maíz (se generan 44.000 toneladas al año en Córdoba), la cual presenta buenas propiedades para su aprovechamiento energético (Mendoza et al., 2021).

Otro recurso energético de gran potencial en Córdoba es la biomasa residual de la ganadería, que cuenta con más de 2 millones de cabezas de ganado, generando un estimado de 8,6 millones de toneladas de estiércol bovino al año, suficiente para generar un estimado de 1.125 millones de metros cúbicos de biogás usando la digestión anaeróbica (León Mejía & Novoa Posada, 2018).

Una necesidad energética básica de los hogares es la refrigeración de alimentos, que consume entre el 39% y el 50% de la electricidad residencial en Colombia (Ministerio de minas

y energías, 2016). Una alternativa de refrigeración en zonas no interconectadas y de difícil acceso, es la refrigeración por absorción, que puede alimentarse del uso de energías renovables (Calise et al., 2017; Lazzarin & Noro, 2018).

La implementación de sistemas de refrigeración por absorción en zonas no interconectadas requiere de estudios de viabilidad técnica y económica de las diferentes alternativas de fuentes energéticas disponibles. La eficiencia del sistema sería un indicador fundamental para definir la solución óptima. Por consiguiente, es importante analizar estos sistemas termodinámicamente con un enfoque de segunda ley, para poder determinar la eficiencia real de los procesos y el aprovechamiento de la energía disponible.

3. Objetivos

3.1. General

Analizar termodinámicamente un sistema de refrigeración por absorción-difusión para la refrigeración de alimentos activado con diferentes fuentes de calor.

3.2. Específicos

- Identificar los principales parámetros de operación de un sistema de refrigeración por absorción accionado con fuentes renovables.
- Evaluar el desempeño energético y exergético global del sistema de refrigeración por absorción operando con diferentes fuentes de calor.
- Evaluar los costos de operación del sistema de refrigeración por absorción activado con diferentes fuentes de calor.

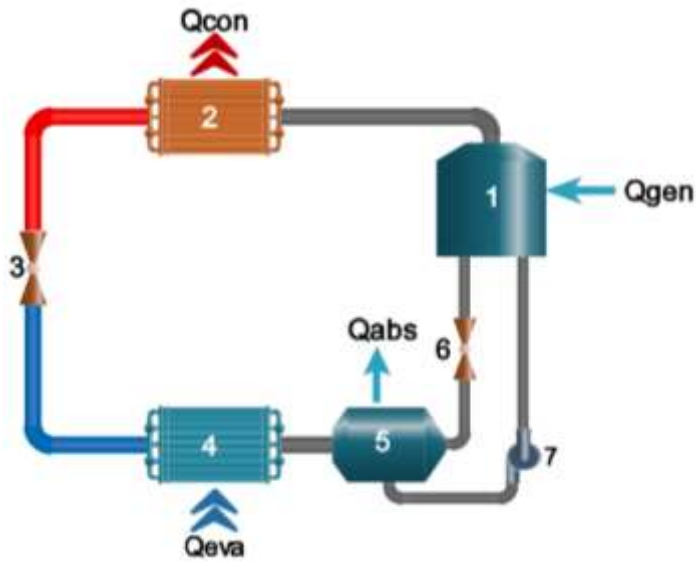
Capítulo II: Revisión de la literatura

4. Refrigeración por absorción

El sistema de refrigeración por absorción se basa en los mismos principios básicos del sistema de refrigeración por compresión de vapor, en donde se hace circular un refrigerante el cual de manera alternante se evapora a una baja presión absorbiendo calor y se condensa a alta presión entregando calor al entorno que se desea refrigerar, la diferencia radica en que la energía necesaria para mantener el proceso, mientras en el ciclo de compresión se requiere energía eléctrica o trabajo para mover el compresor, en el ciclo de absorción se requiere calor para la activación del generador.

Esta característica hace de los sistemas de refrigeración por absorción una tecnología más flexible, ya que el calor de activación puede provenir de diversas fuentes como lo son, geotérmica, solar, calor residual de centrales de cogeneración e incluso el gas natural.

El primer refrigerador por absorción de calor de funcionamiento continuo fue inventado por Carré en 1859 y usaba originalmente una mezcla amoníaco-agua como fluido refrigerante. En la **Figura 1**, se muestra el ciclo y los componentes básicos de un ciclo de refrigeración por absorción.



1. Generador.
2. Condensador.
3. Válvula de expansión
4. Evaporador.
5. Absorbedor.
6. Válvula de expansión
7. Bomba.

Figura 1. Ciclo de refrigeración por absorción de calor.
Adaptado de: (Mansouri et al., 2016)

El ciclo de absorción consta de los siguientes componentes: generador, condensador, evaporador, absorbedor, dos válvulas de expansión y una bomba.

I. **Generador:** Es la parte del sistema que contiene solución rica (es decir una mezcla con altas concentraciones de refrigerante) y que recibe el calor de activación del sistema, este calor evapora parte del refrigerante separándolo del absorbente y es llevado al condensador.

II. **Condensador:** Es el dispositivo en el cual el refrigerante en estado de vapor sobrecalentado cede calor al ambiente circundantemente causando el enfriamiento del refrigerante hasta la temperatura de saturación.

III. **Válvula de estrangulamiento:** la función de este elemento es causar una caída de presión apropiada para la entrada al evaporador; causando una evaporación de una porción del refrigerante, cambiado de fase de líquido saturado a una mezcla liquido-vapor de baja calidad.

IV. **Evaporador:** Su función es la de absorber el calor almacenado en su interior, esto se da debido a que el refrigerante toma calor del medio, aumentando su temperatura.

V. **Absorbedor:** Es una unidad en donde se mezcla nuevamente el amoníaco gaseoso y la solución amoníaco-agua. Esta mezcla se lleva a cabo de manera eficiente a bajas temperaturas y al mismo tiempo la mezcla produce calor, el cual es transferido al ambiente, una vez esta mezcla se encuentre en ese dispositivo, entrara de nuevo al generador para volver a realizar el ciclo.

VI. **Bomba:** Se usa para elevar la presión de la solución fuerte y llevarla nuevamente al generador.

4.1. Ciclo de refrigeración por absorción de medio ciclo

El ciclo de medio efecto se emplea con fuente de calor a temperaturas entre de 65-80° C, lo cual se convierte en su principal ventaja, en este rango un equipo de absorción simple trabajaría con muy bajo desempeño. A diferencia de los ciclos convencionales este sistema presenta tres niveles de presión, baja, intermedia y alta.

La alta y baja presión se comportan de igual forma que en el ciclo de simple efecto. El rango intermedio de presión se tiene en el intercambio de refrigerante vaporizado que existe entre generador a baja presión (generador de baja) y el absorbedor a alta presión (absorbedor de alta), donde el vapor de refrigerante es absorbido por la solución, antes de fluir hacia el generador de alta donde alcanza su punto de ebullición por segunda vez. En la **Figura 2** se presenta una esquemático del ciclo.

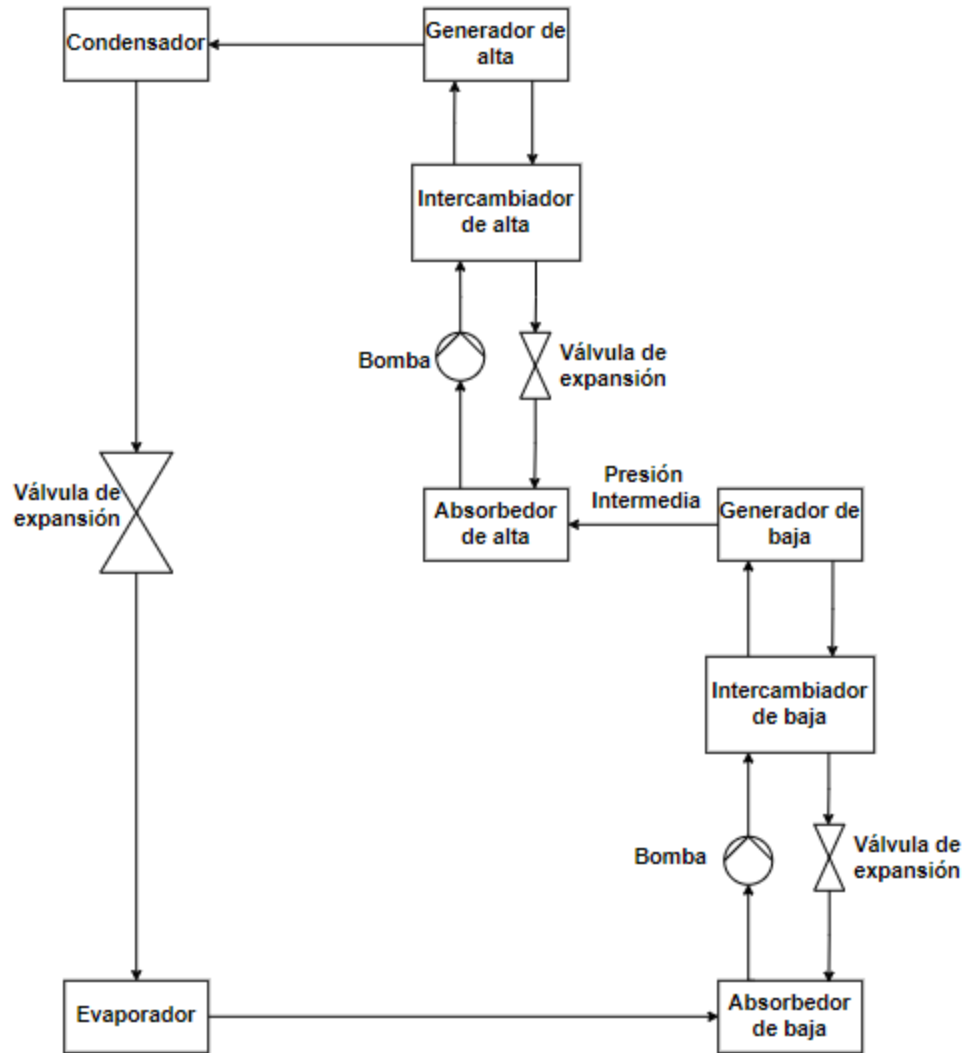


Figura 2. Ciclo de refrigeración por absorción de medio ciclo
Adaptado de: (El Haj Assad et al., 2021)

4.2. Ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto

Los sistemas de refrigeración por absorción operan con fuentes de calor a temperaturas entre 140 y 170°C, valores superiores a los sistemas de simple efecto; lo que se traduce en un aumento en el desempeño del equipo. Esta mejor operación se logra mediante la incorporación de un generador, un condensador y un intercambiador de calor.

En la **Figura 3** se muestran los componentes y la estructura del ciclo de doble efecto.

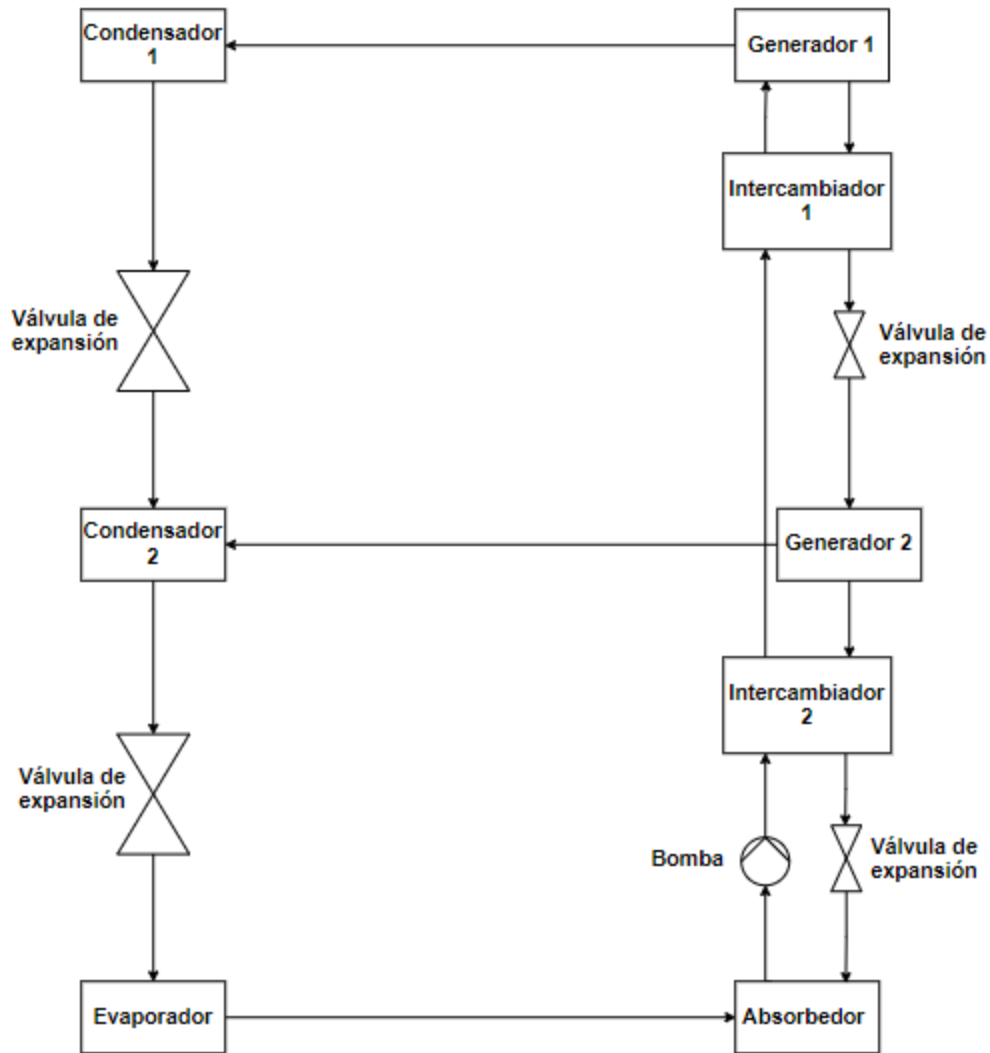


Figura 3. Ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto
Adaptado de: (El Haj Assad et al., 2021)

4.3. Ciclo de refrigeración por absorción de triple efecto

Los ciclos de refrigeración por absorción de triple efecto, permite aprovechar una cantidad de calor más grande que los ciclos más sencillos, lo que implica un mayor desempeño del sistema, requiriendo para ello mayor temperatura de la fuente de calor.

Se diferencia del ciclo de doble efecto en la existencia de un generador adicional de alta temperatura, además de un condensador adicional, de modo que el ciclo consta de tres generadores y tres condensadores. En la **Figura 4** se presenta la estructura básica del ciclo.

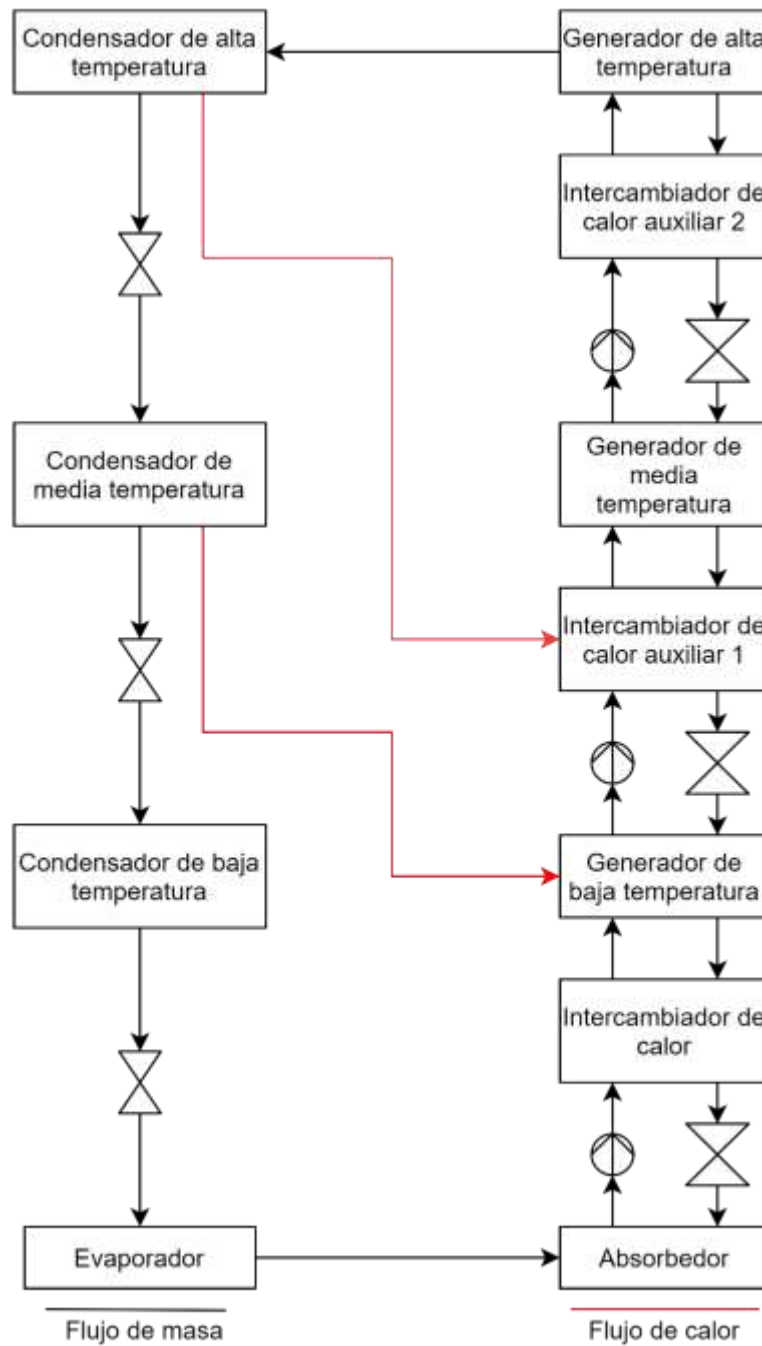


Figura 4. Ciclo de refrigeración por absorción de triple efecto
Adaptado de: (Nikbakhti et al., 2020)

4.4. Ciclo de refrigeración por absorción-difusión

Los sistemas de refrigeración por absorción-difusión en comparación con un ciclo convencional se diferencia en que este opera a una presión uniforme. El fluido de trabajo es una mezcla de tres componentes: amoníaco como refrigerante, agua como absorbente y un gas inerte auxiliar, frecuentemente hidrógeno o helio. El gas inerte es necesario para reducir la presión parcial del refrigerante en el evaporador y dejar que se evapore a bajas temperaturas, estos sistemas son muy silenciosos ya que no tienen partes móviles (Mansouri et al., 2016).

El ciclo de refrigeración por absorción convencional presenta inconvenientes para ser usado a pequeña escala, debido a al alto consumo de energía asociado a la bomba, por lo que se obtiene un bajo coeficiente de desempeño. Para solucionar ese problema surgieron los equipos de refrigeración por absorción-difusión, el cual basa su funcionamiento en la ley de las presiones parciales de Dalton, manteniendo las presiones constantes en cada parte del sistema mediante el gas auxiliar (Rodríguez-Muñoz & Belman-Flores, 2014).

En la **Figura 5** se presenta un esquemático del ciclo de refrigeración por absorción-difusión. Los principales componentes del sistema son: generador / bomba de burbujas, condensador, evaporador, intercambiador de calor de solución (SHE), intercambiador de calor de gas (GHX), depósito y absorbente.

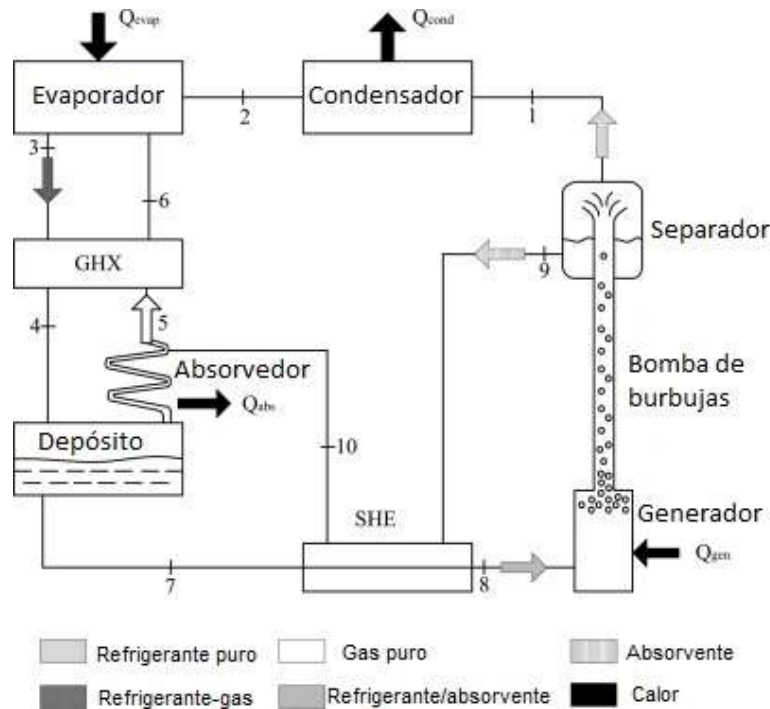


Figura 5. Ciclo de refrigeración por absorción-difusión.
Adaptado de: (Rodríguez-Muñoz & Belman-Flores, 2014)

4.5. Fluido de trabajo para la refrigeración por absorción

El rendimiento de un sistema de refrigeración por absorción depende significativamente de las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo (Mansouri et al., 2016). Entre las principales propiedades que deben tener las mezclas refrigerantes se encuentran:

- Debe ser miscible en fase líquida, dentro del rango de temperaturas en las que opere el sistema.
- Debe ser químicamente estable.
- No puede ser tóxico.
- No deben presentar riesgo de explosión.

Son muchas las mezclas refrigerantes que se han evaluado en la actualidad buscando encontrar mejores eficiencias en el sistema. Macrisset al. (1988) realizaron una recopilación de

todas las sustancias que podían ser usadas en los equipos de refrigeración por absorción, construyendo una lista de aproximadamente 40 refrigerantes y 200 absorbentes. Pero en la actualidad las sustancias más utilizadas para refrigeración por absorción son las mezclas refrigerante/absorbente; amoníaco-agua (NH_3/H_2O) y agua-bromuro de litio ($H_2O/LiBr$) dado que presentan una alta estabilidad en un rango amplio de temperatura y presión. Recientemente se han investigado también las mezclas Monometolamina-Agua (MMA/H_2O), la cual muestra un buen comportamiento con fuentes de calor a bajas temperaturas (Isaza et al., 2010). En la **Tabla 1** se presentan algunas de las mezclas refrigerantes y sus características.

Tabla 1.

Característica de algunas mezclas refrigerantes.

Característica deseada	NH₃-AGUA	LiBr-H₂O	MMA-AGUA
Temperatura de generación	alta (>120°C)	media (>80°C)	baja(>60°C)
Presión de operación	Alta (10-15 bar)	Vacío(0,01bar)	Baja(5-7bar)
Calor latente	Medio	Alto	Bajo
Rectificación	Si	No	Si
Eficiencia	Baja	Alta	Baja
Toxicidad	Alta	Baja	Alta
Inflamabilidad	Media	Baja	Alta
Cristalización	No	Si	No
Corrosión	Baja	Moderada	Baja
Costos reactivos	Baja	Alto	Alto
Viscosidad	Baja	Baja	Baja

Tomado de: (Isaza et al., 2010)

4.6. Coeficiente de desempeño (COP)

El coeficiente de desempeño (COP por sus siglas en inglés coefficient of performance) de un sistema de refrigeración es la relación entre el calor que es capaz de remover en el espacio a refrigerar y la energía suministrada para el funcionamiento del equipo. Este indicador nos permite realizar comparaciones entre los sistemas, aunque se debe tener en cuenta los límites propios de las tecnologías.

Para el caso de un sistema de refrigeración por absorción que utiliza como energía de entrada, es el calor que se suministra al generador, se puede definir el COP como la relación entre el calor que extrae el evaporador (Q_t), a la temperatura de refrigeración (T_e), y el calor que logra suministrar el generador (Q_s), a la temperatura a la cual este genera (T_g). Luego el COP del ciclo de refrigeración por absorción se puede establecer como se muestra en la ecuación (1):

$$COP = \frac{Q_t}{Q_s} \quad (1)$$

De manera similar se puede determinar el coeficiente de desempeño reversible como se muestra en la ecuación (2).

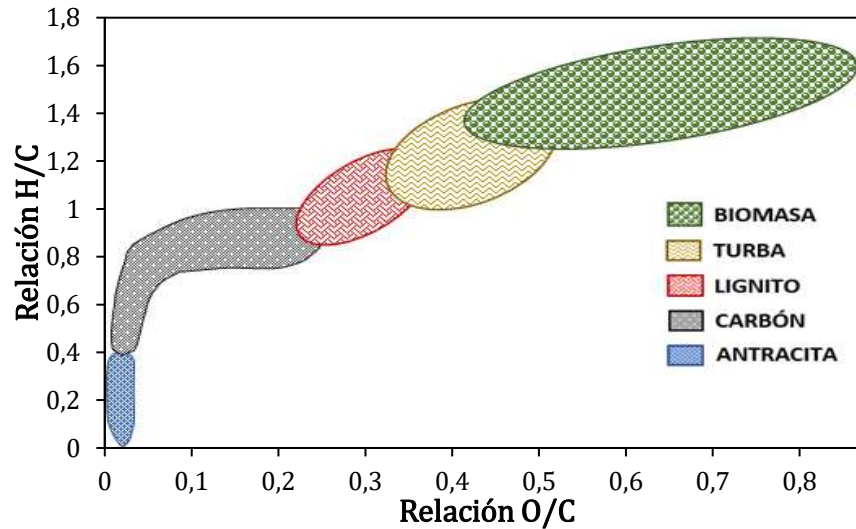
$$COP_R = \frac{T_e(T_g - T_0)}{T_g(T_0 - T_e)} \quad (2)$$

Este coeficiente de desempeño reversible nos indica el máximo COP que puede tener un equipo trabajando con los mismos focos de temperatura.

5. La biomasa como fuente de energía

La biomasa es la materia orgánica no fosilizada y biodegradable procedente de plantas, animales y microorganismos. Esto incluye productos, subproductos, residuos y desechos de la agricultura y la silvicultura, así como también los residuos urbanos.

En contraste con el carbón, la biomasa posee relaciones oxígeno-carbono (O/C) e hidrógeno-carbono (H/C) más altas (ver **Figura 6**), lo cual está asociado a un menor poder calorífico y a una fracción alta de material volátil (Chejne et al., 2017).



*Figura 6: Diagrama de Van Krevelen.
Adaptada de (de Jong & van Ommen, 2014)*

La biomasa de origen vegetal, definida como biomasa lignocelulósica está conformada estructuralmente por tres macromoléculas que interaccionan entre sí por medio de puentes de hidrógeno: celulosa, hemicelulosa y lignina (Chejne et al., 2017). Las proporciones de estos componentes y las características de la biomasa (porosidad, espesor de paredes, orientación de la fibra, etc.) varían dependiendo del origen de la biomasa, lo que genera variaciones en las propiedades fisicoquímicas y a diferentes comportamientos al someterlas a procesos

termoquímicos (Chejne et al., 2017). La **Tabla 2** muestran los rangos típicos de contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de la biomasa.

Tabla 2:

Porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina en la biomasa vegetal.

Macromolécula	Rango (%)
Celulosa	40 – 60
Hemicelulosa	15 – 25
Lignina	15 – 25

Adaptado de: (Basu, 2018)

5.1. Caracterización energética de la biomasa

La biomasa presenta una estructura compleja, por lo que para el estudio de su aprovechamiento energético se requiere previamente de análisis estructurales y fisicoquímicos con el fin de definir, usos potenciales, pretratamientos requeridos, tecnologías de aprovechamiento, desempeño y potencial energético (Dayton & Foust, 2020).

Los análisis estructurales permiten determinar la composición de la biomasa en términos de las macromoléculas presentes (celulosa, hemicelulosa y lignina). Entre de los análisis fisicoquímicos más importantes tenemos, el análisis próximo, el análisis elemental y los ensayos de poder calorífico.

El **análisis Próximo** que expresa la composición de la biomasa en términos de los componentes generales, como el carbono fijo (FC), el material volátil (VM), la humedad (MC) y las cenizas (A), de manera que la suma del porcentaje de estos corresponda al 100 % (Ver ecuación (3))(Basu,2018).

$$FC + VM + MC + A = 100 \% \quad (3)$$

Donde el carbono fijo representa el carbón sólido de la biomasa e incluye el carbón transformado en el proceso de análisis, el material volátil se refiere al vapor condensable y no condensable que libera la biomasa cuando es sometido a calor, las cenizas que son residuos inorgánicos y la humedad es la de equilibrio de la sustancia (Basu, 2010).

El ensayo puede ser desarrollado con base en la norma ASTM D7582 “Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis”, donde se establece el procedimiento adecuado para analizar y preparar las muestras de biomasa.

La finalidad del **análisis elemental** es determinar la composición del combustible con base a sus elementos más básicos, exceptuando la humedad y el contenido de cenizas. Con este análisis se puede estipular los porcentajes en peso de materia, las cantidades de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre presentes (Basu, 2018) tal como se indica en la ecuación (4).

$$C + H + O + N + S + MC + A = 100 \% \quad (4)$$

De igual forma como en el análisis próximo, la ASTM tiene una norma que rige y controla los procedimientos empleados para realizar en análisis elemental, para ello se puede emplear la norma ASTM D3176 *Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke*, la cual proporciona una guía para llevar a cabo el estudio. Cabe resaltar que los resultados en el análisis próximo y elemental para el contenido de humedad y el porcentaje de cenizas son equivalentes.

Por su parte el **poder calorífico** es una propiedad que indica la cantidad de energía que es capaz de liberar una unidad de masa o volumen de una sustancia cuando es quemada por completo. Se distinguen dos tipos de poderes caloríficos, el poder calorífico superior (HHV) y el

poder calorífico inferior (LHV), los cuales varían dependiendo de la fase del agua en los productos de la combustión. La relación entre los poderes caloríficos puede ser descrita por la ecuación (5) presentada a continuación, donde H y M son los porcentajes de hidrógeno y humedad, respectivamente, h_g es la entalpía de formación del vapor de agua.

$$LHV = HHV - h_g \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right) \quad (5)$$

El HHV se puede determinar experimentalmente con una bomba calorimétrica. Para ello se hace uso de la norma ASTM D2015 denominada “Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter”, la cual especifica la metodología requerida para realizar el ensayo y obtener resultados confiables. Finalmente, por medio de la ecuación (3) se puede determinar el LHV de la biomasa.

5.2. Fuente de biomasa

El maíz es uno de los principales a nivel mundial, se cultiva en gran variedad de climas y zonas geográficas continentales, y con una producción de 795 millones de toneladas se ha convertido en uno de los cereales más importante globalmente (Fenalce, 2020). En la actualidad se han obtenido rendimientos experimentales de producción hasta de 24 t/ha (Fenalce, 2020).

Entre los desechos que se generan durante el cultivo de maíz se incluyen el tallo de la planta, las hojas y el olote, los que representan el 54,65 % de la biomasa total de la planta de maíz, de la cual la tusa representa el 9,35 % (Rhenals & Torres, 2016). La **Figura 7** muestra la caracterización de generación de residuos de cultivo de maíz.

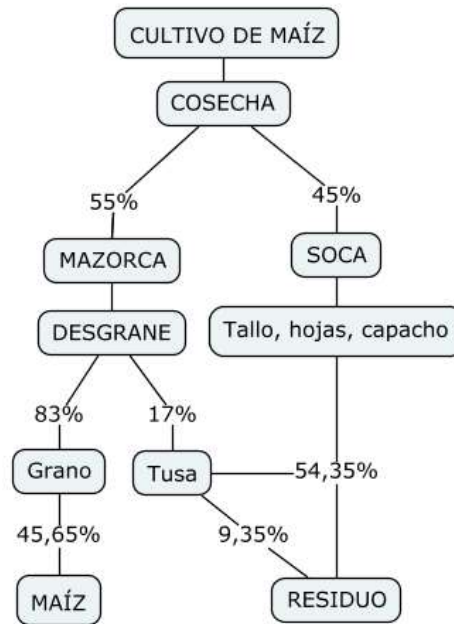


Figura 7. Distribución de los productos generados en el cultivo de maíz.
Tomado de:(Rhenals & Torres, 2016)

La tusa es una biomasa residual de las actividades agrícolas, que puede ser usada como combustible o materia prima para otros procesos de transformación termoquímica. Se estima que en el departamento de Córdoba se generan aproximadamente 44 mil toneladas de tusa de maíz por año (Mendoza et al., 2021), siendo una de las biomásas con mayor potencial energético en el departamento (Sagastume et al., 2021). Por otro lado presenta buenas propiedades para ser aprovechada en el procesos de transformación termoquímica, como gasificación y la combustión (Gomez et al., 2021; Lesme et al., 2020; Mendoza et al., 2021; OPUREB&DANM, 2016).

5.3. Gasificación de biomasa

La gasificación es un proceso de conversión termoquímico en atmósfera controlada donde la materia orgánica o combustible sólido se transforma en un gas combustible, experimentando una disminución del contenido energético en su estado final. En el proceso de gasificación, cualquier tipo de material combustible, sea fósil u orgánico, se transforma en

hidrocarburos ligeros, monóxido de carbono, hidrógeno y otros gases, cuya mezcla se le conoce como gas de síntesis (syngas).

El poder calorífico del gas depende del agente gasificante utilizado, como se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3.

Variaciones del poder calorífico del syngas según el agente gasificante.

Agente gasificante	Poder calorífico (MJ/Nm³)
Aire	4 – 7
Vapor de agua	10 – 18
Oxígeno	12 – 28
Hidrógeno	> 30

Adaptado de: (Basu, 2018)

En un proceso típico de gasificación tienen lugar procesos secuenciales donde se van desarrollando las reacciones responsables de la formación del gas. Cada una se distingue por las condiciones termoquímicas específicas en que se lleva a cabo el proceso, es así como se determinan cuatro procesos principales, cuyo orden depende el tipo de tecnología utilizada.

- *Secado:* Es la etapa inicial de la gasificación, su finalidad es reducir la humedad contenida en la biomasa. Se suele dar en condiciones de presión atmosférica, en un rango de temperatura de 100 °C a 200 °C. La humedad ideal para gasificar oscila entre el 10 % y 20 %, dado que cada kilogramo de humedad en la biomasa requiere de 2260 kJ de energía para evaporarse y permitir iniciar la conversión, es por ello que el exceso de humedad en un orden superior al 20 % es desfavorable en el rendimiento del proceso,

debido a que se producen pérdidas de energía. Una vez terminada esta etapa la humedad ronda el 5 %.

- *Pirólisis*: Es un proceso de degradación térmica de la materia en ausencia de oxígeno y agente gasificante, a temperaturas que oscilan entre los 200 y 600 °C. Es un proceso endotérmico que descompone el material volátil de la biomasa para formar residuos carbonosos (char), hidrocarburos condensados y ligeros y otros gases, mediante la adición de calor autotérmicamente o alotérmicamente.

- *Gasificación/combustión*: Es una etapa de oxidación parcial que se desarrolla a temperaturas entre los 700 y 1200 °C. En esta etapa los subproductos de la pirólisis como el char, tars y los gases empiezan a reaccionar y fraccionarse en presencia del agente gasificante y calor, formando concentraciones de CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, entre otros gases. Además, se libera gran cantidad de calor, el cual sirve para proporcionar la energía para el funcionamiento estable del reactor.

- *Reducción*: Posterior a la etapa de oxidación se empiezan a dar una serie de reacciones reductoras, a una temperatura entre los 800 y 1000 °C, donde se continúa descomposición de los hidrocarburos pesados en gases más simples.

Las reacciones que tienen lugar en los procesos descritos anteriormente se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4.*Reacciones químicas del proceso de gasificación de biomasa.*

Tipo de reacción	Reacción	ΔH[kJ/mol]
Devolatilización		
R2: Combustible sólido + Q → char + tars y aceites + gases		
Craqueo secundario y reformado		
R3: Tars+ Q → Carbón + gases		
Reacciones de carbono		
R4	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	+172
R5	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131
R6	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-78
R7	$C + 0,5O_2 \rightarrow CO$	-111
Reacciones de oxidación		
R8	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
R9	$CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2$	-284
R10	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O$	-803
R11	$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$	-242
Reacciones de cambio		
R12	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41,2
Reacciones de metanación		
R13	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	-247
R14	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-206
R15	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-165
Reacciones de reformado con vapor		
R16	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	+206
R17	$CH_4 + 0,5O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	-36

Adaptado de (Basu, 2018)

5.4. Biodigestión de materia orgánica

Es un proceso biológico de naturaleza bacteriana en el cual una materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno y produce una mezcla de gases (biogás), calor y biomasa residual (bioabono). La mezcla de gases obtenida está constituida principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con pequeñas proporciones de hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), las proporciones de estos gases están determinadas por las características del sustrato, de la biodigestión, y el diseño del reactor. La **Tabla 5** muestran las proporciones típicas de estos compuestos en el biogás.

Tabla 5.

Composición de gas de biodigestión.

Compuesto	Concentración
CH_4	45 – 70%
CO_2	25 – 45%
H_2S	5000-50 000 ppm
H_2	<5000 ppm
N_2	<5%
O_2	<5%

Adaptado de : (Molina et al., 2020)

El proceso de biodigestión puede ser dividido por etapas, aunque en la realidad las reacciones relacionadas con cada etapa se dan de manera simultánea, las etapas generales del proceso son:

- **Hidrólisis:** La materia orgánica compleja (hidratos de carbono, proteínas, lípidos, etc.) es degradada por la acción de microorganismos en materia orgánica soluble (azúcares, aminoácidos, ácidos grasos), lo que genera los sustratos para la siguiente etapa.
- **Acidogénesis y acetogénesis:** Distintos grupos de microorganismos, denominados acidogénicos y acetogénicos, procesan esa materia orgánica soluble y

liberan principalmente hidrógeno molecular (H_2), CO_2 y acetato (CH_3COO^-). Dado que la acidogénesis es considerada la etapa más rápida del proceso global, resulta fundamental controlarla para evitar que el descenso de pH (acidificación) del medio interfiera con la acción del agente microbiano.

- **Metanogénesis:** Finalmente, los microorganismos metanogénicos tienen dos vías metabólicas diferentes: la vía acetoclástica, que transforma el ácido acético en CH_4 y CO_2 , y la vía hidrogenotrófica, que a partir del H_2 y el CO_2 genera CH_4 .

6. Energía solar fotovoltaica

La energía solar puede aprovecharse para la generación eléctrica con el uso de paneles solares (ver **Figura 8**). Un panel solar está conformado por varias células que están interconectadas entre sí en serie o en paralelo. Dependiendo de este tipo de conexiones es que se pueden tener paneles solares de diferentes niveles de tensión y corriente generada. Los paneles solares son fabricados generalmente con materiales semiconductores, el semiconductor más usado es el silicio.



*Figura 8. Panel solar.
Fuente: el autor*

En el mercado existen una gran variedad de paneles los cuales presentan diferentes eficiencias en la

Tabla 6 se muestran las tecnologías más usadas.

Tabla 6.

Eficiencias de los paneles solares en función del semiconductor utilizado.

Material semiconductor	Eficiencia
Silicio monocristalino	15 – 17%
Silicio Policristalino	12 – 14%
Silicio Amorfo	<10%

Fuente: Adaptado de (de Kuyper & Morales, 2014)

La intermitencia de la radiación solar hace que sea necesario almacenar la energía eléctrica generada por paneles solares, para lo que se usan baterías de ciclo profundo que permiten una entrega significativa de energía antes de ser cargadas nuevamente. Este es uno de los elementos más críticos del sistema por su tiempo de vida moderado, representando un costo entre el 15 y 30% del costo total del sistema (de Kuyper & Morales, 2014).

6.1. Potencial de energía solar en Córdoba

Por su localización geográfica, Colombia presenta un potencial de radiación promedio de 4,5 kWh/m²/día, con pocas variaciones a lo largo del año (IDEAM, 2020), lo que está por encima del promedio mundial de 3,9 kWh/m²/día (REN21, 2017). Por consiguiente, la energía solar presenta un potencial importante para el país en la migración hacia las energías renovables.

Según los mapas de radiación solar de Colombia, la guajira es la zona del país con mayor radiación solar, con valores de 6 kWh/m²/día, muy por encima del promedio nacional de radiación, este promedio también es superado en la mayor parte de la costa atlántica y en otras regiones específicas en los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta (IDEAM, 2020). En la **Tabla 7** se muestran los niveles de radiación promedio de las regiones del país.

Tabla 7.

Valores de irradiación promedio para diferentes regiones del país.

Región	Radiación promedio (kWh/m²/día)
Guajira	6,0
Costa Atlántica	5,0
Orinoquía	4,5
Amazonía	4,2
Región Andina	4,5
Costa Pacífica	3,5

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015)

Estudios específicos en zonas del departamento de Córdoba concuerdan con el alto potencia de radiación solar y el alto valor de las horas de brillo solar. Palencia-Severiche et al. (2006) estudiaron las condiciones agroclimáticas de Córdoba, por medio del análisis de datos de más de 20 años recolectados en 60 estaciones distribuidas en el departamento, encontrando que el municipio de Tierralta con 1406 horas de brillo solar anual presenta los valores más bajos para estas variables, mientras que montería registra las mayores horas de insolación anual con 2108 horas. En la **Figura 9** se muestra la distribución de horas de brillo solar del departamento.

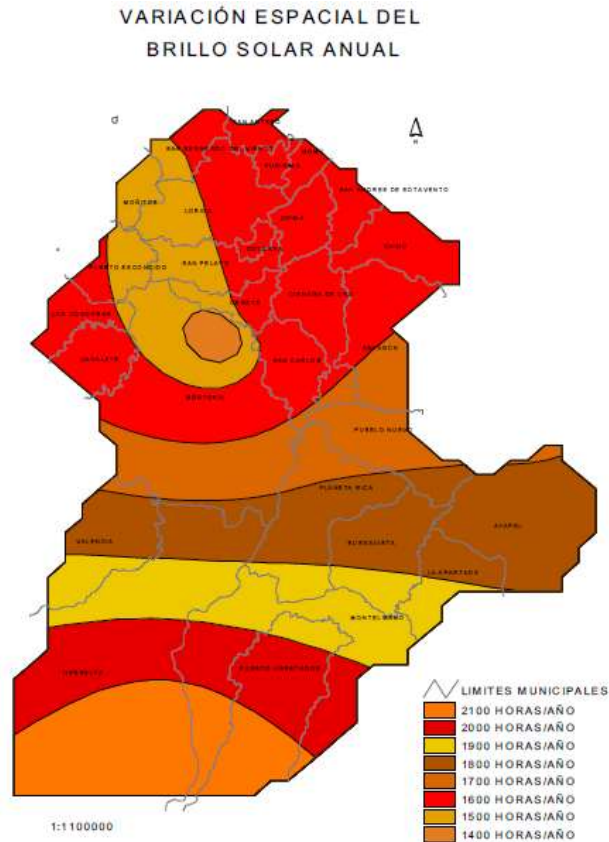


Figura 9. Distribución espacial del brillo solar anual del departamento de Córdoba.
Tomado de: (Palencia-Severiche et al., 2006)

En estudios más recientes de la universidad Pontificia Bolivariana sede Montería, investigaron la generación de energía solar en el departamento, realizando mediciones de la radiación en la ciudad de Montería, encontrando mediciones promedio de 440,383 W/m², pero con grandes variaciones en las horas del día, registrando un valores en el rango de 1068, 47 – 0,01 W/m² en todos los días del año, por lo que sugieren que los estudios de energía solar en el departamento basados en modelos globales arrojan resultados poco confiables (OPUREB&DANM, 2016). En la **Figura 10** se observa el contorno de radiación global anual de Córdoba obtenido.

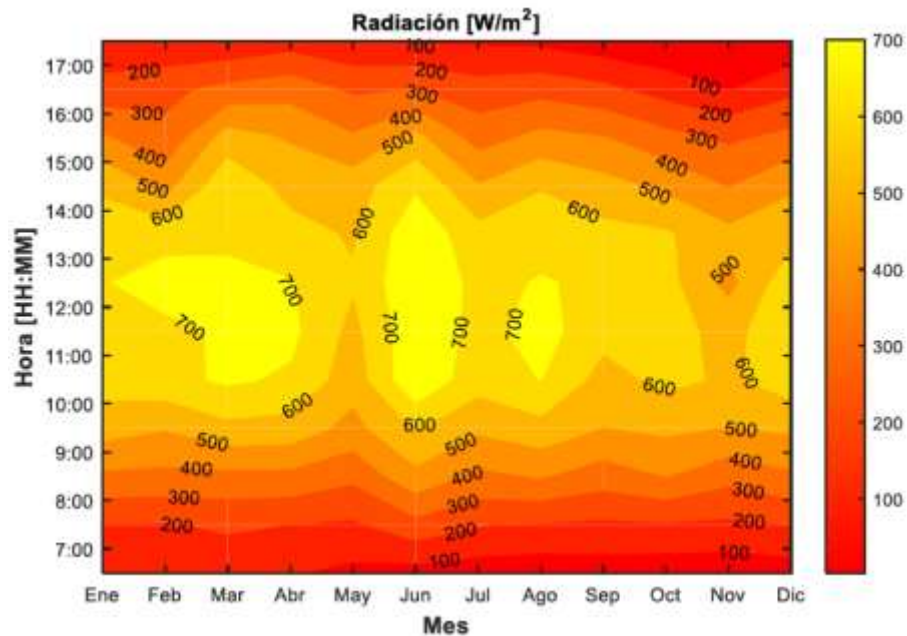


Figura 10. Contorno de radiación global anual del departamento de Córdoba.
Tomado de: (OPUREB&DANM, 2016)

7. Estado del arte

El principio de funcionamiento de los sistemas de refrigeración por absorción se conoce desde 1777, sin embargo no fue hasta 1859 que se desarrolló el primer equipo de refrigeración por absorción de funcionamiento continuo (Mansouri et al., 2016). Esta tecnología presenta dos grandes obstáculos para su desarrollo comercial, relacionados con el bajo coeficiente de desempeño y el gran tamaño de los equipos, no obstante el interés de investigación ha crecido debido a la crisis energética y los problemas medioambientales asociados con los sistemas de refrigeración convencionales, ya que el ciclo de absorción permite la utilización de calor de baja temperatura y usa fluidos de trabajo más amigables con el medio ambiente (Nikbakhti et al., 2020).

Las investigaciones desarrolladas alrededor de los sistemas de absorción tienen una fuerte tendencia hacia el uso de la energía solar térmica como fuente de calor, entre ellos se destaca el

trabajo de Bellos et al., (2017) quienes analizaron la implementación de un sistema de refrigeración por absorción en la ciudad de Atenas, Grecia, funcionando con energía solar térmica, el análisis se realizó en operación dinámica y con enfoque energético, exergético y financiero. Los resultados muestran que la optimización económica conlleva a diseños más sostenibles, en comparación con la optimización de la eficiencia exergética. Por su parte Asadi et al., (2018) realizaron el análisis termoeconómico y la optimización multiobjetivo de un sistema de refrigeración por absorción alimentado por varios colectores solares, el estudio se realizó para cuatro tipos de colectores solares y la optimización se desarrolló por el método de enjambre de partículas, finalmente se obtuvo que el colector más óptimo desde el punto de vista económico fue el de tubo de vacío, mientras que la mayor eficiencia exergética se alcanzó con el colector cilindro parabólico. Otros estudios investigan sistemas de refrigeración híbrido impulsados por energía solar, como Al-Nimr & Mugdadi, (2020) quienes investigan el comportamiento de un sistema de refrigeración conformado por ciclo de absorción y refrigerador termoeléctrico, usando un panel solar para accionar el refrigerador termoeléctrico y un colector cilindro-parabólico para alimentar el sistema de absorción, los resultados encontrados muestran parámetros como temperatura ambiente y velocidad del viento, tienen un efecto insignificante sobre este tipo de sistemas.

En cuanto a la integración con gasificación de biomasa como fuente de activación directa de equipos de refrigeración por absorción, la literatura encontrada es incipiente, la mayor parte de las aplicaciones se concentran en alternativas de poligeneración, donde la refrigeración por absorción es utilizada para aprovechar los calores residuales de ciclos de generación de energía. Entre los estudios de esta aplicación se encuentra el realizado por Rokni (2018) quien diseña un sistema de generación de calor, frío y energía eléctrica por medio de gasificación de residuos

municipales integrado a refrigeración por absorción con bromuro de litio-agua y celdas de combustible de óxido sólido, para ello se desarrolló una simulación y análisis paramétricos, tomando como variable fundamental la eficiencia global del sistema, del trabajo se destaca que aunque la eficiencia del sistema es relativamente baja, aspectos como la autosostenibilidad y las bajas emisiones de este tipo de sistemas, respaldan esta aplicación. Por otro lado, Balafkandeh et al., (2019) desarrollaron la optimización multiobjetivo de un sistema de trigeneración, combinando ciclo de turbina de gas, ciclo de CO₂ super crítico y refrigeración por absorción, como fuente de energía se evaluaron dos alternativas, la gasificación y la biodigestión de biomasa, el estudio se basó en la teoría exergética y exergoeconómica, los resultados encontrados muestran que la biodigestión es una mejor alternativa que la gasificación, en cuanto al costo, a la eficiencia y al impacto ambiente. La gasificación de biomasa integrada a refrigeración por absorción con LiBr y deshumidificador por sólidos desecantes fue investigada por Li et al., (2019) para su aplicación en el sector residencial de Singapur, en el estudio la gasificación se simuló por medio de un modelo basado en equilibrio químico, el refrigerador de absorción se simuló con redes neuronales y el sistema de sólidos desecante por medio del modelado dinámico, el análisis se basó en aspectos energéticos, económicos y ambientales y en los resultados se destaca que la operación del sistema presenta alta sensibilidad a los costos de materia prima.

De igual manera que para la gasificación, no se encontraron estudios sobre combustión directa de biogás para activar el ciclo de absorción, las aplicaciones de esta fuente de calor en la refrigeración por absorción encontradas en la literatura corresponden a alternativas de cogeneración o trigeneración, estos se puede mencionar el trabajo de Cacua et al., (2016) quienes evaluaron experimentalmente la trigeneración de energía eléctrica, calor y frío, por medio de

motor de combustión interna dual diésel-biogás acoplado a refrigeración por absorción, encontrando que el sistema era más eficiente al funcionar con diésel como combustible, sin embargo el impacto ambiental en la operación con biogás fue significativamente menor. También Sevinchan et al., (2019) investigó la poligeneración mediante la combinación de ciclo Brayton, ciclo Rankine orgánico y refrigeración por absorción activado por biogás, desarrollando para ello un modelo del sistema de integración y realizado la evaluación energética y exergética, concluyendo que los elementos más destructores de exergía fueron la cámara de combustión, el evaporador del ciclo Rankine orgánico y el digestor.

Los estudios de aprovechamiento de energías renovables de forma directa en refrigeradores de absorción están concentrados al uso de la energía solar térmica y energía geotérmica, mientras que los sistemas fotovoltaicos, la gasificación de biomasa y la digestión anaerobia son poco estudiados, investigando principalmente en aplicaciones de cogeneración, ya que a gran escala su aplicación directa parece no ser viable, sin embargo, la implementación de estos sistemas como fuente de calor para los refrigeradores de absorción a pequeña escala y/o aplicaciones domésticas requieren de estudios que evalúan su viabilidad técnica y económica.

Analizando por medio de las palabras claves, la información de literatura presente en la base de datos WOS (Web of Science) para los últimos 11 años, por medio de las palabras claves “Absorption cooling” o “Absorption chiller” se encuentra la distribución de frecuencias que se muestra en la **Figura 11**. Donde se nota la tendencia hacia el estudio de la energía solar como fuente de activación y el análisis basado en exergía.

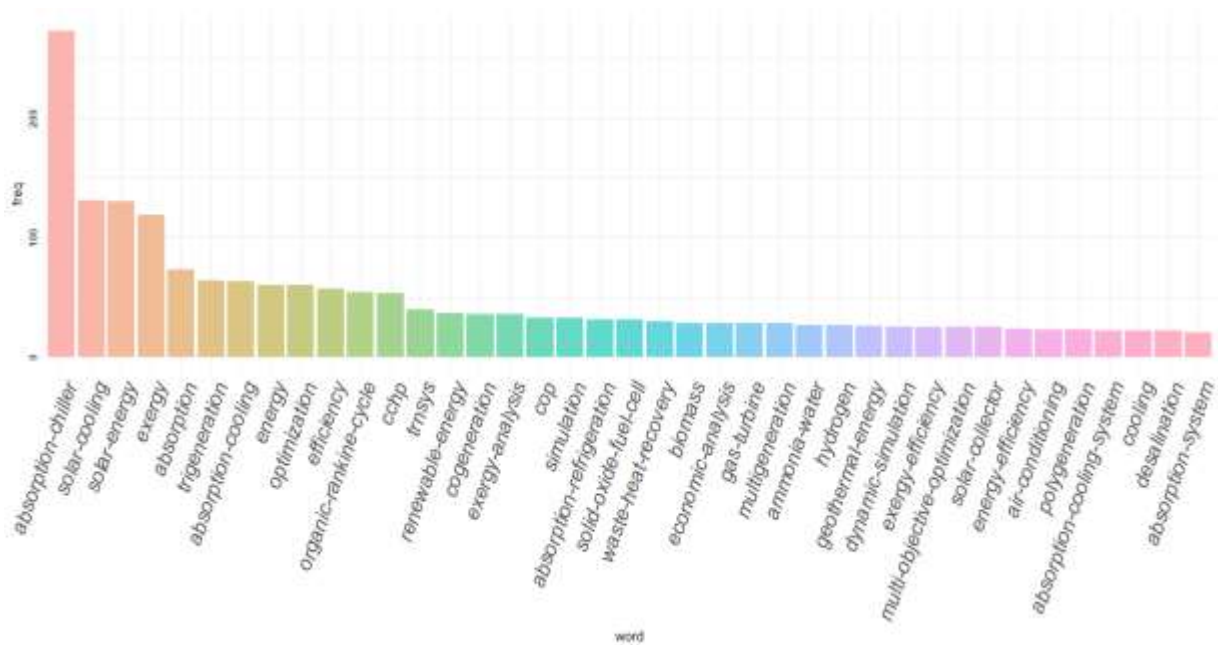


Figura 11. Distribución de palabras claves usadas en la literatura.
Elaboración propia

De la **Figura 11** se observa que los estudios de refrigeración con fuentes de generación, como la biomasa por medio de gasificación o biodigestión son poco frecuentes y en general están limitados a la integración de tecnologías de generación de potencia y ciclo de absorción, lo que se evidencia en la aparición de terminos como “trigeneration”, “organic Rankine cycle”, “cchp”, “cogeneration”, “ccp”, “gas turbine”, “multigeneration” y “poligeneration”.

En la **Figura 12**, se muestra una red de co-palabras para los estudios de referencia, donde se identificó la palabra “Exergy” como temática central, esta red está conformada por 10 subtemas, indicando las asociaciones entre ellas, estos subtemas muestran la consolidación y relevancia de los estudios alrededor de esta temática tales como:

“hydrogen”, “absorption-cooling”, “energy”, “geothermal”, “solar-energy”, “biomass”, “Efficiency”, “multigeneration”, “geothermal-energy”, donde vemos que la línea que une las

palabras energy, efficiency y exergy es más oscura, indicando que estas palabras aparecen con mayor frecuencia juntas dentro de una misma publicación.

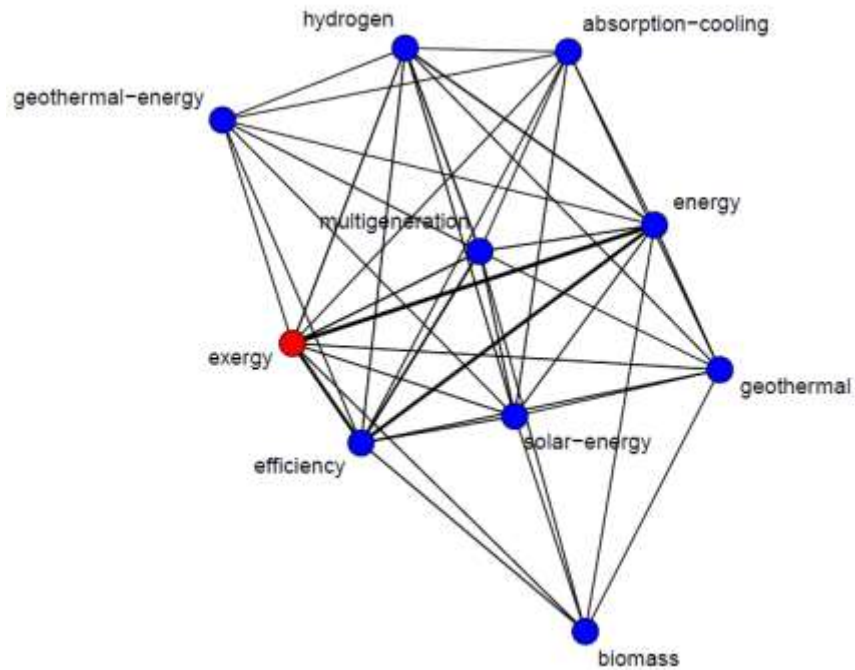


Figura 12. Red de asociación de co-palabras
Elaboración propia

En la red también se muestra que las palabras “absorption-cooling” y “biomass” no se relacionan directamente, sin embargo ambas se relacionan de forma indirecta por medio de la palabra “multigeneration” lo que respalda la carencia de estudios de implementación directa de esta fuente de energía en los sistemas de absorción.

Capítulo III: Materiales y métodos

8. Caracterización de las fuentes de energía

En este trabajo se busca evaluar el funcionamiento de un sistema de refrigeración por absorción de calor activado por medio de fuentes renovables, como posible solución a las necesidades de conservación de alimentos en zonas no interconectadas, del departamento de Córdoba, para esto se consideran las siguientes fuentes de energía renovables.

- Energía de la biomasa de contenido ruminal bovino aprovechada por biodigestión anaerobia.
- Energía solar fotovoltaica la cual se evalúa con acumulación de energía eléctrica por medio de baterías.
- Energía de la biomasa de tusa de maíz transformada por medio de la tecnología de gasificación de biomasa en gas combustible.

Adicionalmente para establecer comparaciones, también se estudió el comportamiento del sistema utilizando las dos fuentes de energía base para las que fue diseñado; energía eléctrica 110V y gas licuado de petróleo (GLP).

Para la energía solar fotovoltaica se considera las condiciones de radiación de la ciudad de Montería, en cuanto a la tusa de maíz se considera la asociada al cultivo de maíz amarillo, el contenido ruminal bovino es tomado de una planta de sacrificio ubicada en la ciudad.

El estudio de la implementación de refrigeración por absorción con fuentes renovables no solo depende de aspectos relacionados a la eficiencia energética, por lo que

también se consideraron, aspectos económicos, autonomía del sistema y accesibilidad a las tecnologías.

8.1. Caracterización de la biomasa

Para la generación de biogás se seleccionó como materia prima contenido ruminal bovino, el cual se genera en grandes cantidades en plantas de sacrificio del departamento, debido a la alta actividad ganadera; así mismo para el proceso de gasificación se usó tusa de maíz, el cual es un subproducto con alto potencial energético debido que su volumen de producción es grande y tiene buenas propiedades fisicoquímicas (Rhenals & Torres, 2016). En la **Figura 13** se pueden ver las materias primas usadas para la producción de los combustibles, la **Figura 13a** muestra el contenido ruminal bovino mientras las **Figura 13b** muestra la tusa de maíz que se usará en la gasificación.

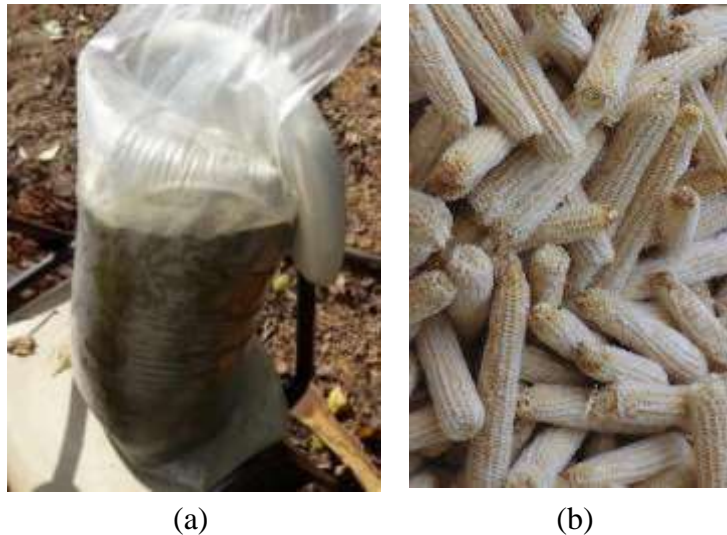


Figura 13. (a) Rumen fresco para biodigestión. (b) Tusa de maíz para gasificación
Fuente propia del autor

Para poder inferir sobre los potenciales disponibles de transformación de las biomásas de tusa de maíz y contenido ruminal bovino, se caracterizaron las biomásas por medio de análisis elemental y próximo, los cuales fueron realizados por el laboratorio de carbones de la

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, bajo los estándares que se muestran en la

Tabla 8.

Tabla 8.

Estándares para la realización de análisis próximo y elemental.

Análisis	Parámetro	Norma
Próximo	Humedad residual	(ASTM D3173 / D3173M-17a, 2017)
	Cenizas	(ASTM D3174-12, 2018)
	Material Volátil	(ISO 562-10, 2010)
	Carbono fijo	(ASTM D3172-13, 2013)
	Azufre total	(ASTM D4239-18, 2018)
	Poder calorífico	(ASTM D5865 / D5865M-19, 2019)
Elemental	C	(ASTM D3177-02, 2007)
	H	(ASTM D3177-02, 2007)
	O	Por diferencia
	N	(ASTM D5373-16, 2016)
	S	(ASTM D3177-02, 2007)

Elaboración propia

Otro parámetro que es importante para el proceso de digestión anaerobia es el pH de la materia orgánica, el cual está fuertemente relacionado con la formación de metano en la metanogénesis ya que los pHs mayores que 7 inhiben las bacterias promotoras de este proceso (Olaya & Gonzalez, 2009).

8.2. Caracterización de la energía solar

La caracterización de la energía solar se realizó usando los datos medidos en la ciudad de Montería por la Universidad Pontificia Bolivariana, en el marco del proyecto “Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales del departamento de Córdoba” desarrollado por los grupos de investigación OPUREB y DANM, con estos datos se calculó la radiación promedio en la ciudad mes a mes y

se obtuvo una distribución normalizada de la radiación en las horas del día usando un modelo gaussiano.

Estos datos finalmente permitieron establecer un número mínimo de horas de funcionamiento analizando el escenario más crítico, calculando la radiación mínima necesaria para obtener la potencia necesaria para la operación del equipo (I_{min}), por medio de la ecuación (6).

$$I_{min} = \frac{P_{refrigerador}}{\eta_{panel} \times Area_{panel}} \quad (6)$$

Donde $P_{refrigerador}$ es la potencia del refrigerador; η_{panel} es la eficiencia del panel y $Area_{panel}$ el área del panel.

En la **Tabla 9** se muestran las características del panel solar que se usó para las estimaciones y posterior experimentación.

Tabla 9.

Características técnicas del panel solar.

Tipo de modulo	USP-5M-200P-36
Potencia máxima (Pmax)	200 W
Tolerancia de generación	3%
Corriente de potencia máxima (Imp)	11.14 A
Voltaje de potencia máxima (Vmp)	17.95 V
Corriente de corto circuito (Isc)	12.05 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	22.02 V
Dimensiones [mm]	1320X992X35
Voltaje máximo del sistema (Vpc)	1000

Adaptado de ficha técnica del equipo

9. Obtención de combustibles gaseosos

A continuación, se describen los procesos utilizados para la producción del gas obtenido por digestión anaerobia (biogás) y el gas de gasificación (syngas).

9.1. Proceso de digestión anaerobia

Para el proceso de digestión anaerobia usó como reactor un cilindro de 13,3 litros, el cual fue equipado con manómetro y termocupla para registrar datos de variación de presión y temperatura. El reactor fue cargado con rumen fresco hasta un 70% de la capacidad del cilindro. En la **Figura 14** se observa el biorreactor utilizado para este proceso.



*Figura 14. Reactor de biodigestión utilizado
Fuente: El autor*

El proceso de biodigestión anaerobia tardó 27 días posterior a esto se determinó la composición del gas producido, usando un cromatógrafo Micro 490-gc Agilent Technologies de 3 columnas mediante la aplicación de la norma estándar ASTM E260-96; con esta composición se procedió a estimar el poder calorífico del biogás por medio de la ecuación(7).

$$LHV_{gas} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot LHV_i \quad (7)$$

Donde i son todas las especies químicas presentes y n es el número total de especies químicas

En la **Figura 15** se muestra el cromatógrafo utilizado en la caracterización del gas.



Figura 15. Cromatógrafo de gases utilizado, laboratorio de energías renovables UPB
Fuente: El autor

9.2. Proceso de gasificación

El proceso de gasificación de biomasa fue realizado en un microgasificador de dos zonas, el cual tiene una zona para la combustión y otra para la gasificación, esto disminuye la fracción de gas producto que hace combustión completa dentro del reactor, en la **Figura 16** podemos ver una imagen del microgasificador usado en la experimentación.



Figura 16. Microgasificador de dos zonas

Fuente: El autor

Durante las pruebas se midió la temperatura de en la zona de combustión y gasificación por medio de termopares, el experimento se llevó a cabo manteniendo fijas las condiciones que se muestran en **Tabla 10** debido a que pruebas previas mostraron que dichas en dichas condiciones se obtiene un gas con mejores propiedades.

Tabla 10.

Condiciones del proceso de gasificación.

Variable	Condición
Flujo de biomasa en gasificación	0,14 kg/min
Temperaturas en combustión	850-950 °C
Exceso de aire en combustión	70%
Defecto de aire en gasificación	50%

Elaboración propia

La composición del syngas fue determinada por medio de cromatografía de gases (ver Anexo I) y por medio de la ecuación (7) se determina el poder calorífico del gas.

10. Sistema de refrigeración

Los experimentos se desarrollaron en un equipo de refrigeración de absorción-difusión que emplea mezcla $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ como fluido de trabajo e hidrogeno como gas auxiliar, diseñado originalmente para funcionar con energía eléctrica y gas licuado de petróleo (ver **Tabla 11**) el refrigerador fue instrumentado para censar las temperaturas del proceso por medio de termopares tipo K para tuberías y se dispuso una carga térmica a la cual se midió su temperatura con una termocupla tipo J y se recolecto la información por medio de una tarjeta de adquisición de datos.

Tabla 11.

Características técnicas del equipo de refrigeración.

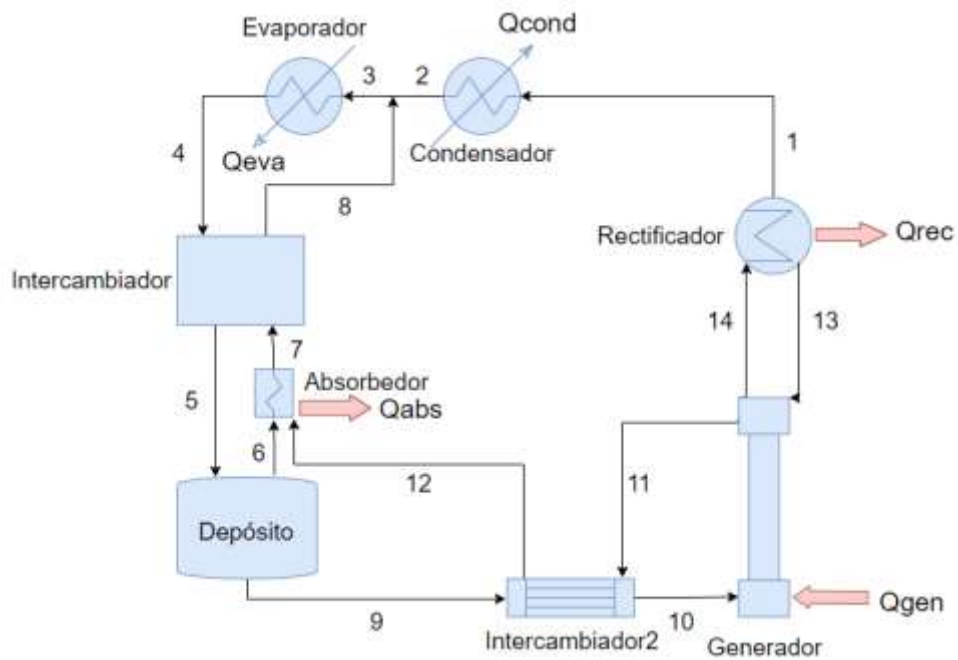
Modelo	XC-60
Voltaje nominal	AC 110V/DC 12 V
Potencia de entrada	AC 90W/DC 90W
Frecuencia nominal	60 Hz
Combustible	Propano
Consumo de combustible	25 g/h
Refrigerante	R-717
Serial	1311808090007

Adaptado de: ficha técnica del equipo. Fuente propia

En la **Figura 17** se muestra el equipo de refrigeración así como también los puntos donde se tomaron las temperaturas, el montaje experimental se desarrolló con base en la metodología planteada por Mansouri et al., (2016).



(a)



(b)

Figura 17. (a)Puntos de medición de temperatura en el refrigerador. (b) Ciclo de refrigeración por absorción-difusión analizado *Elaboración propia*

Se evaluó el funcionamiento del equipo con biogás, energía solar fotovoltaica y syngas como fuentes renovables de energía. Para obtener una línea base-se realizaron ensayos con los

combustibles de diseño del equipo, energía eléctrica 110 V y gas licuado de petróleo (GLP) las cuales se tomaron como punto de referencia.

10.1. Montaje experimental

Para las pruebas con gas se adaptó un medidor de caudal entre el refrigerador y el suministro, para el caso del gas se gasificación, debido a la temperatura de los gases y a la presencia de material particulado y alquitranes se hizo pasar el syngas previamente por un sistema de limpieza, el cual ayudaba a enfriar y a eliminar impurezas en el combustible. Adicionalmente fue necesario adaptar al quemador una válvula de alimentación de sección variables, debido a que la válvula que viene de fabrica está diseñada para funcionar solo con GLP que presenta una densidad muy diferente al syngas y biogás.

La experimentación con energía eléctrica se llevó acabo conectando directamente el equipo a la red, mientras que para la energía solar se usó un módulo fotovoltaico cuyas características se muestran en la **Tabla 9**, además se usó un regulador de carga MPPT y dos baterías de 155 Ah.

En la **Figura 18** se muestra el montaje experimental general, para todas las fuentes de energía evaluadas.

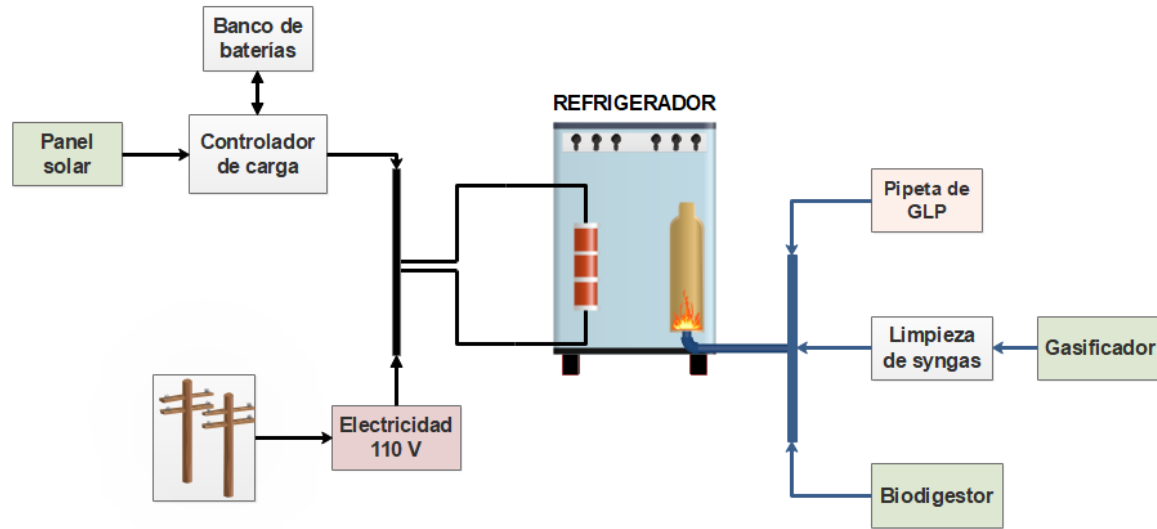


Figura 18. Montaje experimental general.
Elaboración propia

11. Análisis energético del sistema de refrigeración

Con el fin de conocer las transformaciones energéticas y el desempeño del sistema se realizó un análisis termodinámico basado en la primera ley, para ello se realizaron las siguientes consideraciones.

- Las propiedades termodinámicas se estiman por medio del modelo de Peng Robinson.
- El combustible se quema completamente en el combustor del equipo.
- La caída de presión en condensador, evaporador y demás equipos de intercambio de calor es despreciable.
- El gas auxiliar del sistema no participa en los procesos de transformación energética.
- Las soluciones refrigerantes rica y pobre en el sistema tienen composición homogénea.

- La pérdida de calor en el recinto refrigerado es despreciable.
- El conjunto generador, bomba de burbujas y rectificador se analiza como un solo elemento.
- Las condiciones del estado de referencia se tomaron como $T=25\text{ °C}$ y $P=100\text{ kPa}$.

A continuación, en la **Tabla 12** se muestran los balances de energía y masa en cada elemento del sistema.

Tabla 12.*Balance de energía y masa en cada elemento.*

Elemento	Balance de energía	Balance de masa
Combustor	$Q_{comb} = \dot{m}_{comb} \cdot LHV_{comb}$ (8)	N/A
	$Q_{gen} = \eta \cdot Q_{comb}$ (9)	
Generador	$Q_{gen} + \dot{m}_{10} \cdot h_{10}$	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_1 + \dot{m}_{11}$ (11)
	$= \dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_{11} \cdot h_{11}$ (10)	
Condensador	$Q_{cond} + \dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_1 \cdot h_1$ (12)	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$ (13)
Mezcla de líneas 2 y 8	$\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_8 \cdot h_8 = \dot{m}_3 \cdot h_3$ (14)	$\dot{m}_2 + \dot{m}_8 = \dot{m}_3$ (15)
Evaporador	$Q_{eva} + \dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_4 \cdot h_4$ (16)	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ (17)
Intercambiador	$\dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_7 \cdot h_7$	$\dot{m}_5 = \dot{m}_4$ (19)
	$= \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_8 \cdot h_8$ (18)	y $\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ (20)
Absorbedor	$Q_{abs} + \dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_7 \cdot h_7$ (21)	$\dot{m}_7 = \dot{m}_6$ (22)
Depósito	$\dot{m}_5 \cdot h_5 = \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_9 \cdot h_9$ (23)	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_9$ (24)
Intercambiador2	$\dot{m}_9 \cdot h_9 + \dot{m}_{11} \cdot h_{11}$	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$ (26)
	$= \dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{12} \cdot h_{12}$ (25)	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$ (27)

Elaboración propia

Luego de analizado el sistema se procede a calcular el coeficiente de desempeño para cada fuente de energía, el cual se calculó por medio de la ecuación (I)

12. Análisis exergético del sistema de integración refrigerador-fuente de calor

Para el análisis exergético se realizó un balance de exergía de los equipos que integran el montaje con cada una de las fuentes de energía, lo cual permitió calcular las exergías destruidas y el coeficiente de desempeño exergético del sistema. Para ello es necesario calcular las exergías de las líneas de materia, la cual es la suma de una componente física de la exergía y otra componente química, como se muestra en la ecuación (28)

$$b_i = b_i^{\text{ph}} + b_i^{\text{ch}} \quad (28)$$

La exergía física es función del estado termodinámico del proceso y del estado de referencia considerado, para el caso es $T=298 \text{ K}$ y $P=100\text{kPa}$; el cálculo de esta propiedad se realiza por medio de la ecuación (29).

$$b_i^{\text{ph}} = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (29)$$

La exergía química se estima dependiendo de la naturaleza de la línea de materia a evaluar, tal como se muestra a continuación:

- Para la tusa de maíz: se usó una correlación en términos del poder calorífico y un factor exergético que depende de la composición elemental (ver ecuación(30)) de acuerdo a lo planteado por (Costa et al., 2019).

$$b_i^{\text{ch}} = \varphi * \text{LHV}_i \quad (30)$$

Donde, φ se calcula a partir de la ecuación (31)

$$\varphi = \frac{1,0414 + 0,0177 \left(\frac{H}{C}\right) - 0,3328 \left(\frac{O}{C}\right) \left[1 + 0,0537 \left(\frac{H}{C}\right)\right]}{1 - 0,04321 \left(\frac{O}{C}\right)} \quad (31)$$

- ara el contenido ruminal se utiliza el modelo planteado en (Silva et al., 2021) en términos de la composición elemental, según la ecuación (32).

$$b_i^{ch} = 361,3537(C) + 1100,6547(H) - 113,6193(O) + 18,3479(N) + 220,4570(S) \quad (32)$$

- ara el caso del syngas y el biogás se usaron las ecuaciones de exergía química de gas ideal (ecuación (33)) de acuerdo con (Bejan, 2016).

$$b_i^{ch} = \sum_j x_j b_{j0}^{ch} + \bar{R}T_0 \sum_j x_j \ln(x_j) \quad (33)$$

- ara el GLP también se usó una correlación de proporcionalidad respecto al poder calorífico del combustible, por medio de la ecuación (34).

$$b_i^{ch} = \varphi * LHV_i \quad (34)$$

Donde, $\varphi = 1,09$ (Dincer & Rosen, 2007).

Con las exergías calculadas se determinó la exergía destruida en los elementos con base en el balance de exergía y posteriormente se calculó el coeficiente de desempeño exergético del sistema funcionando con las fuentes de energías evaluadas, de esta manera podremos establecer cuál es la fuente de mayor rendimiento considerando las limitaciones impuestas por la segunda ley de la termodinámica.

Se realizó el balance de exergía de los elementos del sistema de refrigeración como se muestra a continuación:

- Para el biodigestor

$$\Psi_j = \dot{m}_j \cdot b_j - \dot{m}_{j+1} \cdot b_{j+1} \quad (35)$$

- Para el gasificador

$$\Psi_j = \dot{m}_j \cdot b_j - \dot{m}_{j+1} \cdot b_{j+1} \quad (36)$$

- Para el combustor o la resistencia eléctrica

$$\Psi_j = (B_j) - \left(1 - \frac{T_o}{T_{s(j+1)}}\right) \cdot Q_{j+1} \quad (37)$$

Donde,

$$T_{s(j)} = \frac{h_{j+1} - h_j}{s_{j+1} - s_j} \quad (38)$$

- Para el refrigerador

$$\Psi_j = \left(\left(1 - \frac{T_o}{T_{s(j)}}\right) \cdot Q_j \right) - \left(\left(1 - \frac{T_o}{T_{s(j+1)}}\right) \cdot Q_{j+1} \right) - \left(\left(1 - \frac{T_o}{T_{sr}}\right) \cdot \sum_r Q_r \right) \quad (39)$$

Donde,

$$T_{s(j+1)} = \frac{h_{j+1} - h_j}{s_{j+1} - s_j} \quad (40)$$

$$T_{s(r)} = \frac{n \cdot T_o + \sum T_r}{2 \cdot n} \quad (41)$$

- Para el panel solar

$$\Psi_j = I_j - W_j \quad (42)$$

Los sistemas con cada una de las fuentes de energía están formados de la siguiente forma:

- Energía eléctrica AC110V: Resistencia(j=1) y Refrigerador(j=2).

- GLP: Combustor (j=1) y Refrigerador (j=2).
- Energía solar: Resistencia(j=1), Panel solar (j=2) y Refrigerador (j=3).
- Biogás: Digestor(j=1), Combustor(j=2) y Refrigerador (j=3).
- Gasificación: Gasificador(j=1), Combustor (j=2) y Refrigerador(j=3).

El cálculo de la exergía destruida con cada fuente de energía se realizó por medio de la ecuación(43).

$$\Psi_T = \sum \Psi_j \quad (43)$$

Posteriormente para determinar el coeficiente de desempeño exergético del sistema se usó la ecuación(44).

$$COP_{ex} = \frac{Q_{ref}}{B_{entrada}} \quad (44)$$

13. Análisis económico

*Se realizó un análisis económico segregando los costos de inversión inicial al tiempo de operación del equipo, para ello fue necesario calcular los costos de los equipos, los cuales con la intención de analizar la escalabilidad de los sistemas se encontraron por medio de ecuaciones basadas en la termoeconomía. En la **Tabla 13***

Ecuaciones consideradas para la estimación de costo de los equipos se muestran las ecuaciones utilizadas para estimar el costo de los equipos en dólares, para la conversión a pesos se consideró un precio del dólar de 3400 pesos.

Tabla 13.

Ecuaciones consideradas para la estimación de costo de los equipos.

Equipo	Ecuación	Referencia
Digestor	$Z_{dig} = 1,218 \cdot EXP \left[2,631 + 1,3673 \cdot (\ln V_{dig}) - 0,06309 \cdot (\ln V_{dig})^2 \right]$	(45) (Razmi & Janbaz, 2020)
Gasificador	$Z_{gas} = 1700 \cdot (\dot{m}_{biomasa})^{0,67}$	(46) (Gamarra Quintero et al., 2021)
Kit solar	$Z_{kit} = 467 \cdot A \cdot n_{celdas}$	(47) (Moharramian et al., 2019)
GLP	$Z_{glp} = 1,3 \cdot m_{glp}$	(48) (UPME, 2021)
Refrigerador	$Z_{ref} = a + b \cdot Q_{ref}^n$ <p>Con costos comerciales se determinaron los valores de a, b y n.</p>	(49) (Querol et al., 2012) (Neveras triviales, 2021)

Elaboración propia

Para el costo de las materias primas se consideró que la biomasa residual (tusa de maíz y rumen) se consiguen a muy bajo costo en zonas interconectadas con buena actividad agrícola, por lo que se asumió un costo de 100 PCO/kg para estos materiales. En cuanto a la energía eléctrica se estableció un costo promedio de 1200 PCO/kWh, según estudios de la UPME.

Para la estimación de costos totales fue necesario determinar un factor de distribución para la inversión inicial, el cual se calculó por medio de la ecuación.

$$\tau = \frac{\gamma \cdot \mathcal{E}}{3600 \cdot N} \quad (50)$$

Donde \mathcal{E} representa el factor de amortización de operación del sistema para lo cual se debe tener en cuenta el tiempo de vida (n) del equipo y el número de horas de operación por año de generación como se ve en la ecuación.

$$\mathcal{E} = \frac{(1 + i_0)^n \cdot i_0}{(1 + i_0)^n - 1} \quad (51)$$

Para la estimación de estos costos se consideró una tasa de interés (i_0) del 10%, un tiempo de vida útil (n) de 10 años y 8700 horas de operación por año (N).

El costo de operación fue determinado por medio de la siguiente ecuación:

$$CO = C_m + \tau \cdot \sum_k Z_K \quad (52)$$

Donde C_m representa el costo de las materias primas y k los equipos necesarios para la operación del sistema.

Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad para determinar la escalabilidad del sistema de refrigeración, para lo cual se varió la capacidad de refrigeración entre 10 y 550 W y se determinó la variación porcentual de los costos.

Capítulo IV: Resultados y discusiones

14. Caracterización de las fuentes de energía

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de las fuentes de energías renovables que se evaluaron como aportantes del calor de activación del sistema de refrigeración absorción-difusión.

14.1. Caracterización de las biomásas

Los resultados del análisis próximo se muestran en la **Tabla 14**, donde observamos que ambas biomásas presentan contenido de material volátil alto, así también se observa un contenido alto de cenizas en el contenido ruminal, en cuando al carbón fijo el valor obtenido es bajo para ambas biomásas, lo que está relacionado con un poder calorífico bajo; siendo este efecto más significativo para el contenido ruminal.

Tabla 14.

Resultados de análisis próximo de las biomásas.

	Tusa de maíz	Rumen
Parámetro	%p/p	%p/p
Humedad residual	10,52	14,53
Carbono fijo	16,54	9,45
Material volátil	65,23	51,4
Cenizas	7,71	24,62

Elaboración propia

El análisis de la tusa de maíz muestra que podría tener buenas propiedades para el proceso de gasificación, debido a su baja humedad y contenido de cenizas; Anukam et al., (2017) encontró valores parecidos para la tusa de maíz en el análisis próximo para volátiles, cenizas y carbón fijo (65,1%, 8,5% y 21,3% respectivamente).

En cuanto al contenido ruminal, se encuentra que tiene propiedades adecuadas para ser biodigestado, ya que presenta alto material volátil que está relacionado con la hemicelulosa presente, la cual beneficia el proceso de hidrólisis y ayuda a la solubilidad de la lignina (López González et al., 2018). El porcentaje de cenizas del rumen podría dificultar su aprovechamiento energético, no obstante valores similares se encontraron en otros estudios de referencia, Gebrehawariat et al., (2016) reporta 21,54%, mientras Sakirkin et al., (2011) reporta porcentajes de ceniza entre 18% y 44%.

Los resultados del análisis elemental se presentan en la **Tabla 15** donde se observa que el oxígeno es el compuesto predominante, seguidos por el carbono, también se evidencia que ambas biomásas están libres de azufre, lo que trae ventajas en cuanto a las emisiones en su aprovechamiento energético por combustión.

Tabla 15.

Resultados de análisis elemental de las biomásas.

Parámetro	Tusa de maíz	Rumen
	%P/P	%P/P
C	39,3	33,56
H	4,97	4,74
N	0,6	1,00
O	47,42	36,08

Elaboración propia

El porcentaje de carbono obtenido para la tusa de maíz muestra que existe una base considerable de material transformable en gases combustibles como metano y monóxido de carbono, por su parte el alto contenido de oxígeno indica que se debe adicionar poco aire al gasificador para evitar que se produzca combustión completa, Shariff et al., (2016) encontró valores similares del análisis elemental de tusa de maíz. Los resultados para contenido ruminal

muestran que composicionalmente se beneficia la formación de metano y dióxido de carbono en el proceso.

El ensayo de poder calorífico superior de la tusa de maíz arrojó un valor de 14,3 MJ/kg, el cual es un valor relativamente alto comparado con los poderes caloríficos de las biomásas en estado natural. Al contenido ruminal no se le realizó ensayos de poder calorífico ya que no esta variable no está relacionada con el proceso de biodigestión. Las mediciones del pH del contenido ruminal dieron como resultado un valor de 7,2 el cual es un valor óptimo para la generación de metano en el proceso.

14.2. Caracterización de la energía solar

La caracterización de la energía solar se realizó inicialmente calculando la radiación promedio por día para cada mes, obteniendo los resultados que se muestran en la **Figura 19** donde notamos que enero y marzo son los meses con mayor radiación, mientras noviembre es el mes con menor radiación promedio.

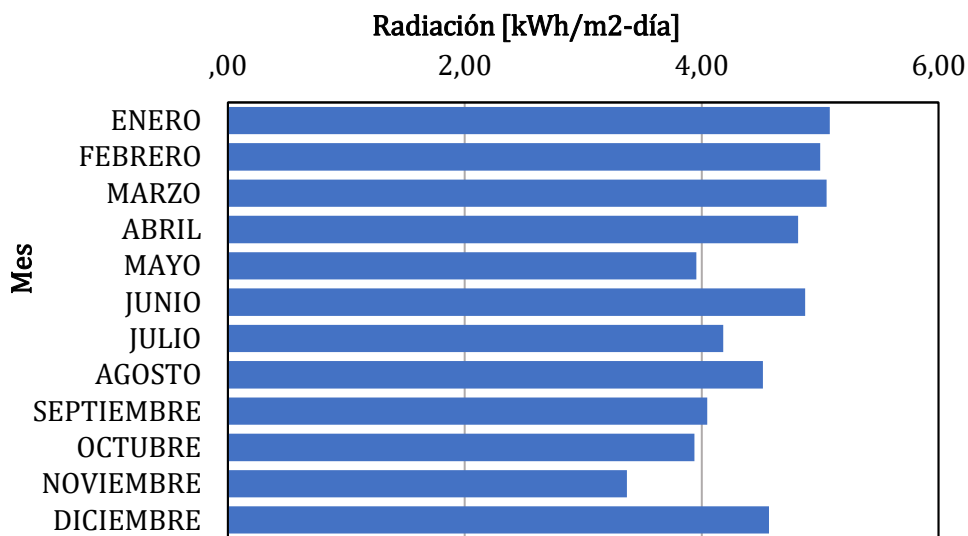


Figura 19. Radiación promedio día de Montería en todos los meses
Elaboración propia con datos de: (OPUREB&DANM, 2016)

También se determinó que para el funcionamiento del equipo de refrigeración eran necesarios 200 W/m^2 de radiación como mínimo, teniendo en cuenta las características técnicas del panel utilizado.

Luego con los valores horarios de todo un año se obtuvo el comportamiento horario de la radiación para un día promedio (ver **Figura 20**), con el cual se obtuvieron los parámetros del modelo gaussiano y con este y los datos de radiación promedio día de cada mes (**Figura 19**) se obtuvo el comportamiento horario para cada mes, el cual se muestra en la **Figura 21**.

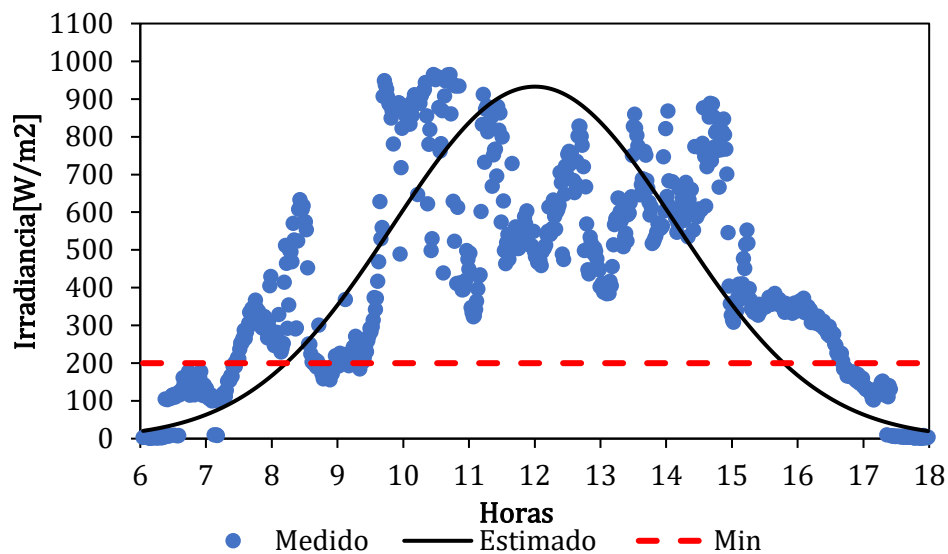


Figura 20. Irradiación horaria promedio durante todo el año (Montería)
Elaboración propia con datos de: (OPUREB&DANM, 2016)

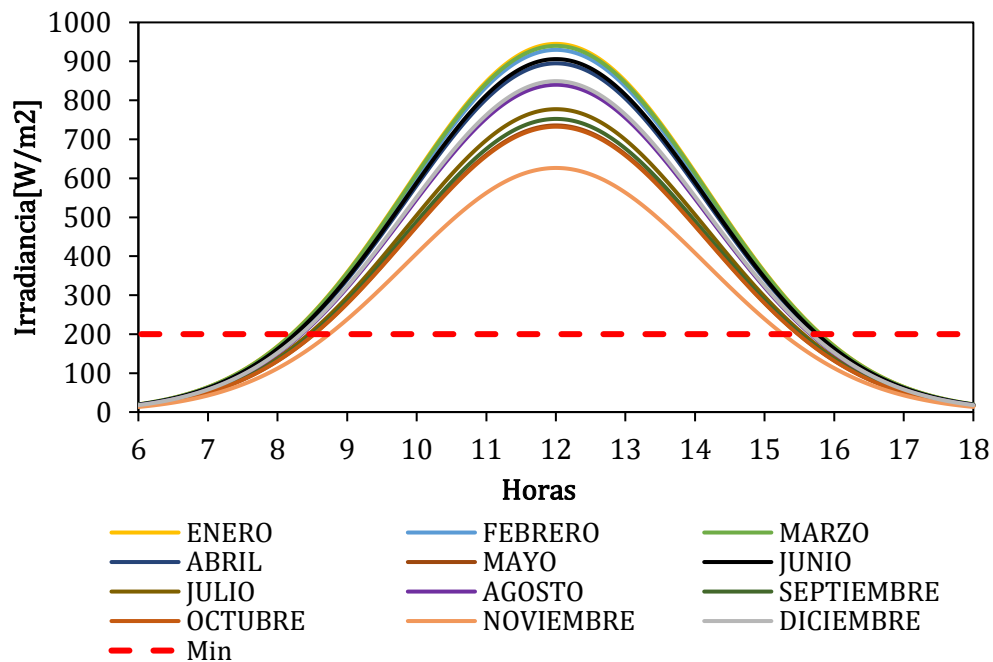


Figura 21. Irradiación horaria promedio mensual (Montería)
Elaboración propia con datos de:(OPUREB&DANM, 2016)

En la **Figura 21** se observa que se tiene un alto potencial de radiación solar en todos los meses para ser aprovechado en el sistema de refrigeración por absorción, teniendo horas de funcionamiento entre 6,5 y 7,56; las cuales se pueden extender almacenando los excedentes en baterías.

15. Obtención de combustibles gaseosos

15.1. Biodigestión de contenido ruminal

Los resultados de medición de presión y temperatura se muestran en la **Figura 22**, la presión en el biodigestor está relacionada con la cantidad de gas que se ha producido, como se observa en el gráfico, para un tiempo mayor a 4 días se tiene una velocidad de generación de gas aproximadamente constante.

La temperatura del proceso es útil para predecir el tiempo óptimo de residencia en el reactor, obteniendo que este rango de temperaturas está relacionado con actividad bacteriana mesofílica por lo que se requiere un tiempo de aproximadamente 30 días (Fuess & Garcia, 2017).

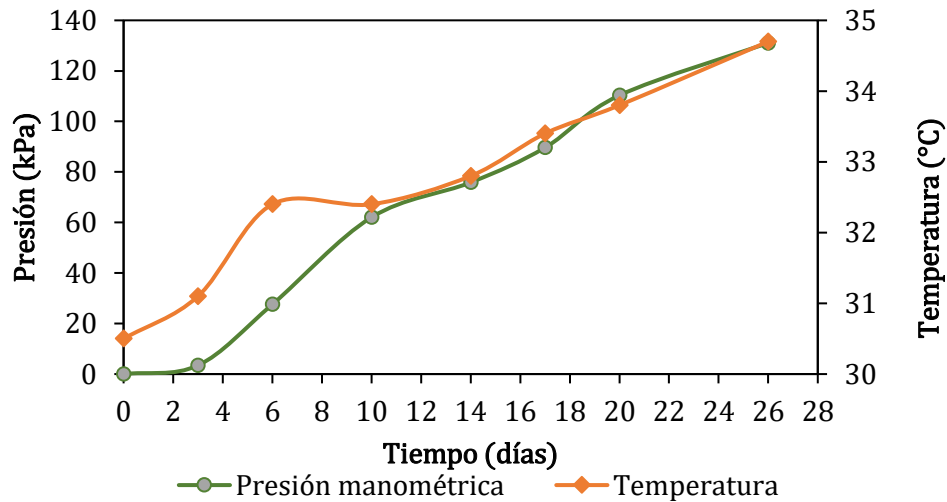


Figura 22. Variación en el tiempo de la temperatura y presión de biodigestión.
Elaboración propia

Finalizado el tiempo de residencia de los biodigestatos se procedió a determinar la composición del gas producido por medio de cromatografía de gases, la cual se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16.

Composición del biogás obtenido.

Componente	Fracción en masa
CH ₄	60%
CO ₂	40%

Elaboración propia

Con esta composición se estima un poder calorífico para el biogás de 30 MJ/kg, siendo superior en un 10% al considerado en el estudio de Siddiki et al., (2021).

15.2. Gasificación de tusa de maíz

Para la gasificación de la biomasa se determinó la variación de la composición del syngas respecto a la cantidad de biomasa en zona de combustión, obtenido que los mejores resultados se obtenían a una temperatura de 800 °C. En la **Figura 23** se muestra la variación de la composición del gas y del poder calorífico (LHV) respecto al flujo de masa en zona de combustión.

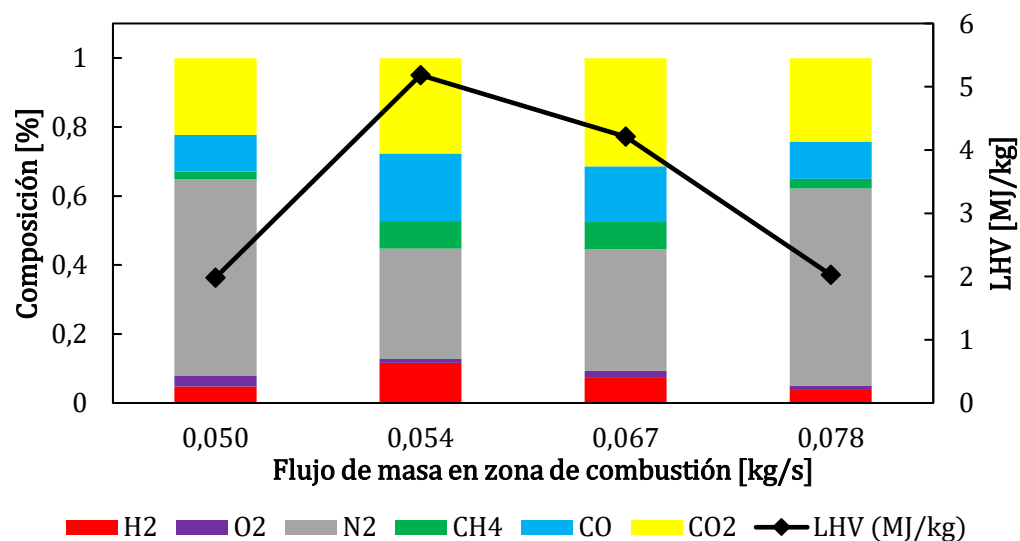


Figura 23. Composición de gas y poder calorífico vs flujo de biomasa en zona de combustión.
Elaboración propia

Los resultados muestran que el syngas con mejores propiedades combustibles se obtiene para un flujo de biomasa en zona de gasificación de 0,054 kg/s; obteniendo un poder calorífico de 5,18 MJ/kg el cual es 15% superior al reportado por Martillo Aseffe et al., (2021) y Gomez et al., (2021) para gasificación de tusa de maíz en gasificadores de tiro invertido, esto se atribuye al diseño del reactor ya que al generarse el calor para el proceso en una cámara independiente se disminuye la fracción de especies combustibles que se queman completamente durante el proceso.

16. Experimentos con el equipo de refrigeración de absorción-difusión

Con las temperaturas censadas y los flujos de masa se determinó el calor que se aporta al generador y el que se extrae en el evaporador, la **Figura 24** muestra el comportamiento de calor de entrada en el generador en el tiempo para cada una de las fuentes evaluadas.

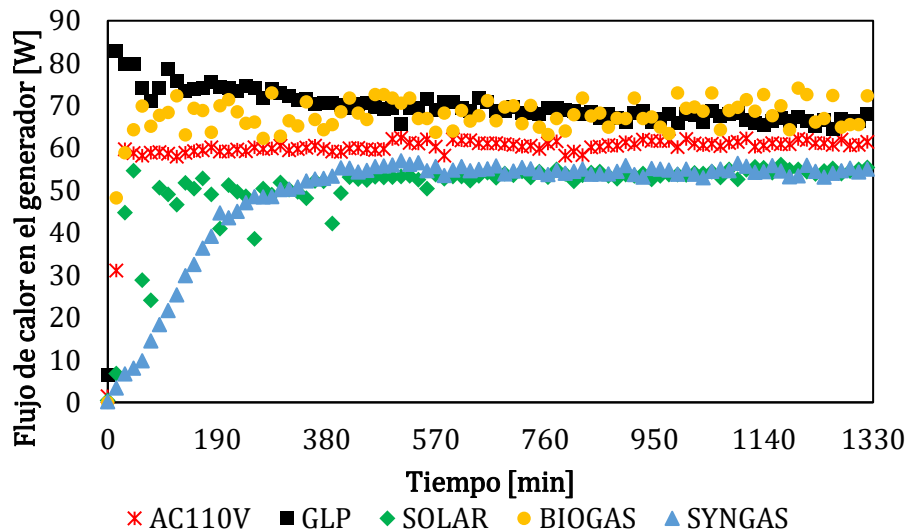


Figura 24. Calor aportado en el generador por cada fuente de energía.
Elaboración propia

Al principio del proceso se observa que él todas las fuentes aportan un calor bajo, posterior a esto, las fuentes deben vencer la resistencia térmica del equipo hasta alcanzar régimen estable, por lo que al final del proceso el calor aportado tiende a ser constante. Se puede notar además que el syngas es la fuente de energía que más tarda en vencer la inercia térmica del equipo. Sin embargo, lo ideal de estos sistemas es que se tengan muchas horas de operación, por lo que este efecto solo sería importante en el arranque del equipo.

En comportamiento del calor extraído en el evaporador, como función del tiempo se muestra en la **Figura 25**.

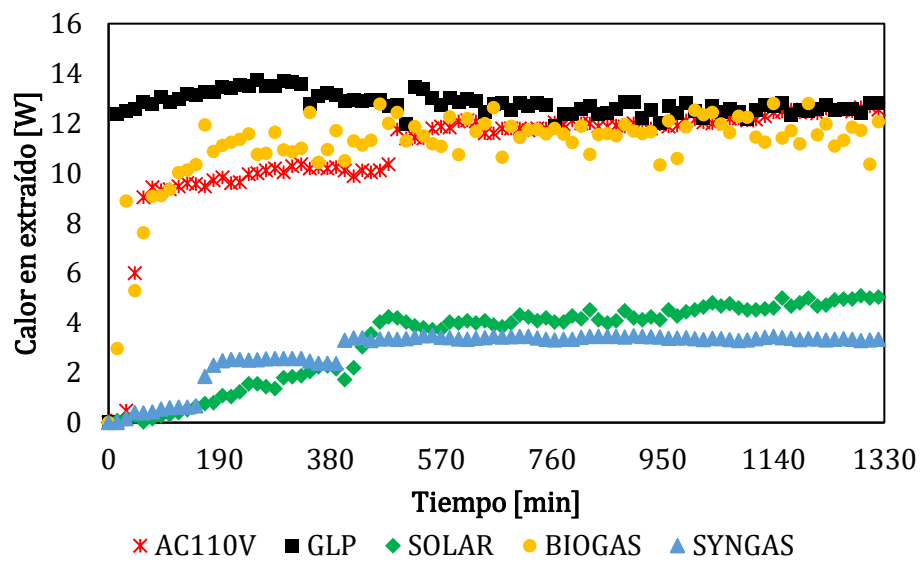


Figura 25. Calor extraído en el evaporador para cada fuente de energía
Elaboración propia

Con el calor aportado y el extraído se calcula el coeficiente de desempeño del equipo para cada fuente de energía, los resultados se muestran en la **Figura 26**.

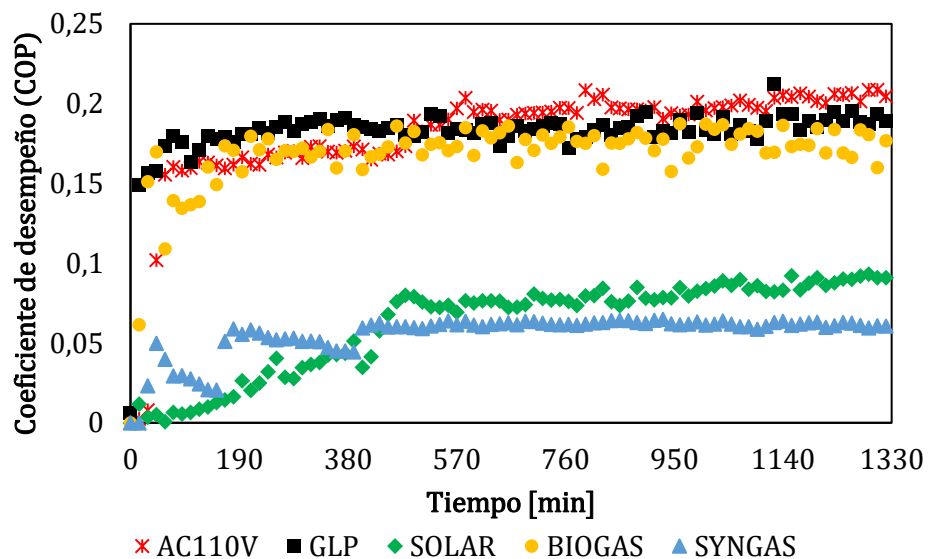


Figura 26. Coeficiente de desempeño del equipo con cada fuente de energía
Elaboración propia

Analizando los resultados promediados luego de alcanzado el régimen estable (ver **Figura 27**) se observa que la fuente de energía que alcanza el mejor desempeño es la energía eléctrica, sin embargo, el biogás se destaca con un coeficiente de desempeño bastante cercano al que se alcanza con las fuentes de energías convencionales (energía eléctrica AC110V y GLP).

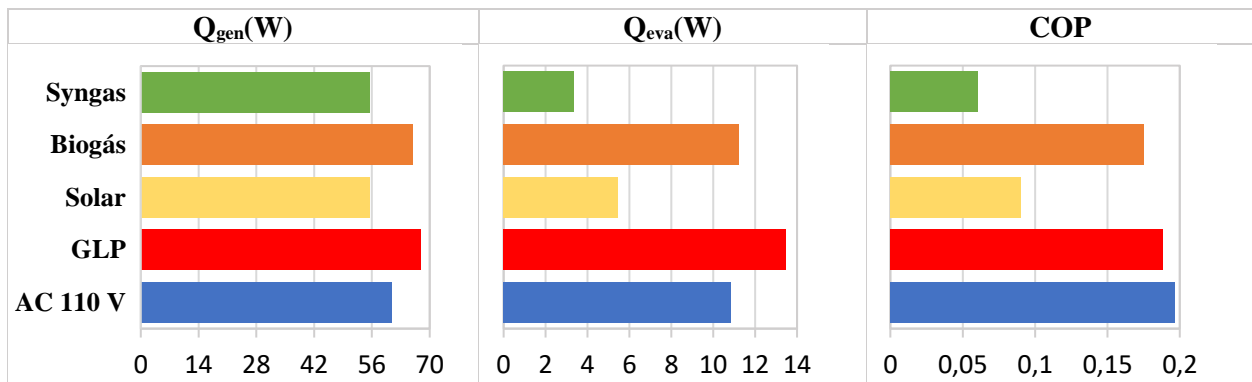


Figura 27. Coeficiente de desempeño, calor extraído en el evaporador y calor aportado en el generador
Elaboración propia

En la literatura se encuentran valores parecidos de los coeficientes de desempeño; así por ejemplo Ben Ezzine et al., (2010) encontró un COP óptimo de 0,175 para un sistema de refrigeración por absorción-difusión diseñado para funcionar con energía solar térmica. Por otra parte Acuña et al., (2013) reporta COP máximo de 0,23 para un sistema funcionando con energía eléctrica y una mezcla amoniaco-agua como fluido de trabajo, con la particularidad de que la temperatura máxima en el generador alcanza a ser de 200 °C. En estudios de simulación de equipos de absorción difusión con energía solar Sayadi et al., (2013) reporta coeficientes de desempeño entre 0,17 y 0,19 y Ben Ezzine, Garma, & Bellagi, (2010) reportan valores entre 0,1 y 0,2 con efectividad del absorbedor del 50%.

17. Análisis exergético del sistema

El análisis exergético del sistema para cada una de las fuentes de energía permitió estimar la exergía destruida en los elementos, los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 28**. Donde se observa que la destrucción de exergía más grande se tiene en las resistencias de calentamiento, esto se debe a que en estos elementos se convierte energía de eléctrica de alta calidad en calor que es una energía de muy baja calidad, produciéndose así una degradación importante de la energía.

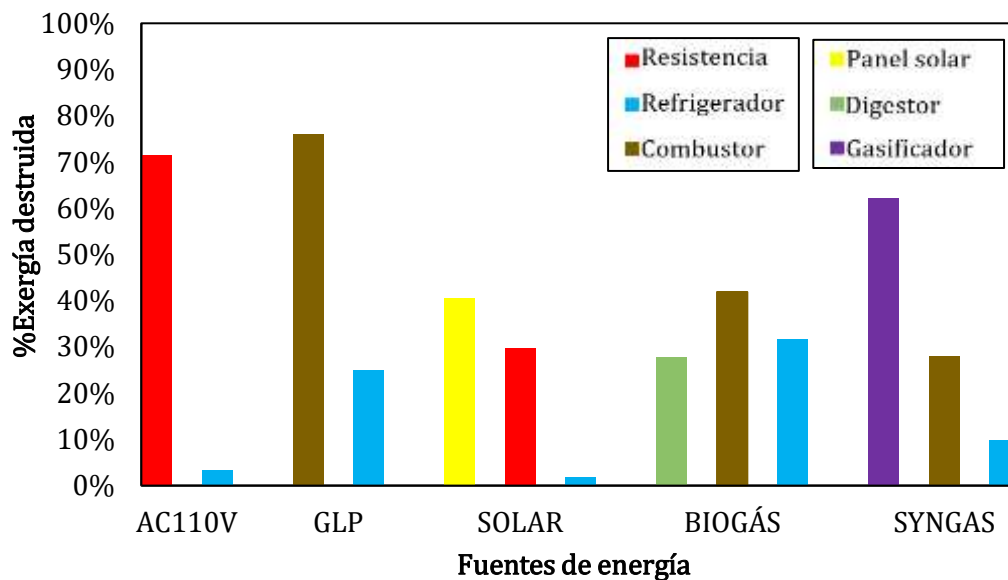


Figura 28. Exergía destruida en los elementos para cada fuente de energía
Elaboración propia

Otro elemento que destruye una cantidad importante de exergía es el panel solar, debido a que la radiación solar tiene una porción de exergía importante, mientras que limitaciones propias de la tecnología hacen que se aproveche menos del 20% de la energía útil que incidente.

Entre los procesos de conversión de biomasa el más destructor de exergía es la gasificación, debido a que en términos generales hay una disminución del poder calorífico entre los productos y reactivos, adicionalmente parte de la exergía de la biomasa se transforma en

calor, provocando una alta temperatura del gas producto y este posteriormente debe ser enfriado en el sistema de limpieza, transfiriendo energía al ambiente.

Con los datos de las exergías calculadas se procedió a determinar el COP exergético, los resultados obtenidos para cada fuente se observan en la **Tabla 17**.

Tabla 17.

Coefficiente de desempeño exergético para cada fuente.

Fuente de energía	Desempeño exergético
AC110V	0,0217
GLP	0,1825
SOLAR	0,0065
BIOGAS	0,1996
SYNGAS	0,0227

Elaboración propia

Los resultados del coeficiente de desempeño exergético muestran que desde el punto de vista de la segunda ley el sistema se comporta mejor con las fuentes que portan calor por medio de combustión, siendo el biogás y el GLP las más eficientes. Sin embargo, en términos generales todas las fuentes presentan un desempeño relativamente bajo, esto se atribuye a que en el generador solo se requiere una temperatura de 130 °C y quemar combustible o convertir energía eléctrica en calor para transferirlo a esta temperatura es un proceso altamente destructor de exergía. Por otro lado, el desempeño del syngas está fuertemente ligado a la destrucción de exergía en la gasificación y a las irreversibilidades asociadas a la mezcla de gases que lo componen, por lo que para mejorar las condiciones de operación del sistema se debe propender por obtener un gas con mejores propiedades. La literatura presenta algunos resultados simulares para el desempeño exergético del sistema, Yildiz & Ersöz, (2013) reporta un desempeño de 0,026. Mientras Aman et al., (2014) presentan valores entre 0,05 y 0,3. Por su parte Yildiz et al., (2014)

estima desempeños en el rango de 0,09 a 0,115 y Vazini Modabber & Khoshgoftar Manesh, (2021) presenta valores entre 0,033 y 0,071.

18. Análisis económico de la refrigeración por absorción-difusión

Para determinar cuál es la mejor fuente de activación para el sistema de refrigeración del sistema se deben determinar los costos de operación del sistema, en la

Tabla 18 se muestra el costo de los equipos necesarios para el funcionamiento del refrigerador con cada una de las fuentes de energía.

Tabla 18.

Costos de los equipos del sistema de integración energética

Equipo	Costo
Digestor	\$ 1.264.800
Gasificador	\$ 5.453.367
Kit fotovoltaico	\$ 3.554.496
Pipeta de GLP	\$ 100.246
Refrigerador	\$ 3.660.833

Elaboración propia

En los costos del gasificador se incluye el costo del sistema de limpieza del syngas y los costos de kit fotovoltaico incluyen controlador de carga y baterías, por su parte los costos del digestor se determinaron como si se fabricara en acero inoxidable.

Con los costos de los equipos se procedió a determinar los costos de operación del sistema con cada fuente de energía, para determinar cuál es la fuente que ofrece mejores beneficios económicos, para ello se supuso una vida útil del equipo de 10 años. En la **Figura 29** se muestran los costos de operación de cada una de las fuentes de energía, los costos de energía eléctrica fueron calculados con un valor de 1600 \$/kW-h, que es el costo promedio de energía en las zonas no interconectadas (Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2016).

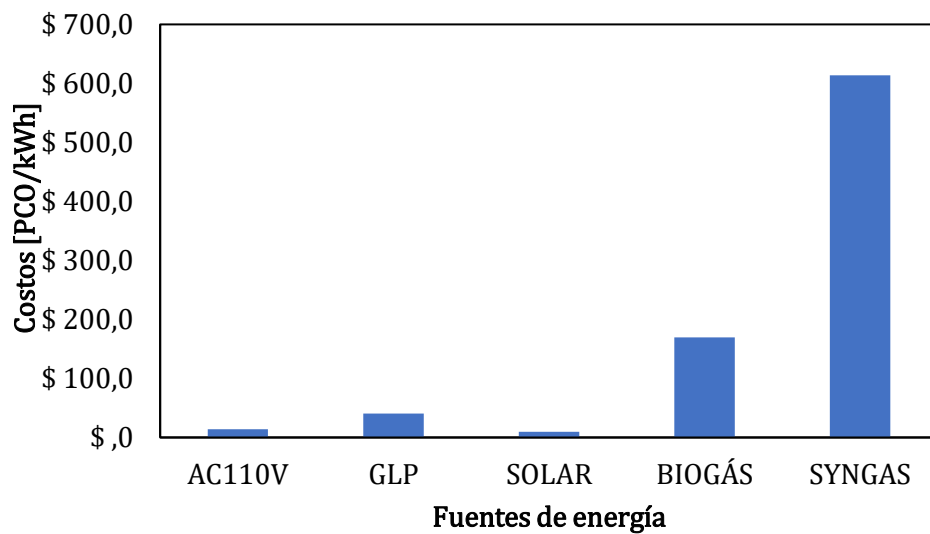


Figura 29. Costos de operación del sistema para cada una de las fuentes de energía
Elaboración propia

El notable que el alto costo que tiene la electricidad en zonas no interconectadas no hace que con esta fuente la operación se más costosa, lo cual se debe a que no se necesitan equipos adicionales, la operación con energía solar presenta el menor costo, lo que la convierte en una alternativa atractiva para su implementación, los costos de operación con syngas son los mal altos, o que se atribuye al alto costo requerido en el gasificador y el sistema de limpieza de gases, el cual muestra un costo elevado que se debe a costo del combustible, en cuanto al syngas a pesar de tener costos de equipos elevados, los bajos costos de materia prima hacen que el costo de la operación sea relativamente bajo, de igual manera sucede con el biogás el cual presenta el segundo costo más bajo después de la energía solar, lo que se debe a el costo bajo de materia prima y de equipos.

Con miras a determinar la escalabilidad de los sistemas se realizó un análisis de sensibilidad de los costos de operación en función de la capacidad de enfriamiento del refrigerador (ver **Tabla 19**).

Tabla 19.

Variaciones de los costos para diferentes capacidades de refrigeración del sistema

Qref [W]	AC110V	GLP	SOLAR	BIOGÁS	SYNGAS
10	\$ 13,86	\$ 40,39	\$ 9,75	\$ 169,60	\$ 614,15
30	\$ 14,16	\$ 40,69	\$ 10,04	\$ 168,50	\$ 611,03
50	\$ 14,22	\$ 40,75	\$ 10,10	\$ 167,69	\$ 609,87
70	\$ 14,24	\$ 40,77	\$ 10,13	\$ 167,12	\$ 609,20
90	\$ 14,26	\$ 40,79	\$ 10,14	\$ 166,69	\$ 608,74
110	\$ 14,26	\$ 40,79	\$ 10,15	\$ 166,35	\$ 608,40
130	\$ 14,27	\$ 40,80	\$ 10,16	\$ 166,07	\$ 608,14
150	\$ 14,28	\$ 40,81	\$ 10,16	\$ 165,83	\$ 607,92
170	\$ 14,28	\$ 40,81	\$ 10,17	\$ 165,63	\$ 607,74
190	\$ 14,28	\$ 40,81	\$ 10,17	\$ 165,45	\$ 607,58
210	\$ 14,28	\$ 40,81	\$ 10,17	\$ 165,29	\$ 607,44
230	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,17	\$ 165,16	\$ 607,32
250	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,17	\$ 165,03	\$ 607,22
270	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,17	\$ 164,92	\$ 607,12
290	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,18	\$ 164,82	\$ 607,03
310	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,18	\$ 164,72	\$ 606,95
330	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,18	\$ 164,64	\$ 606,88
350	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,18	\$ 164,56	\$ 606,81
370	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,18	\$ 164,49	\$ 606,75
390	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,18	\$ 164,42	\$ 606,69
410	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,18	\$ 164,35	\$ 606,64
430	\$ 14,29	\$ 40,82	\$ 10,18	\$ 164,29	\$ 606,59
450	\$ 14,30	\$ 40,83	\$ 10,18	\$ 164,24	\$ 606,54
470	\$ 14,30	\$ 40,83	\$ 10,18	\$ 164,18	\$ 606,50
490	\$ 14,30	\$ 40,83	\$ 10,18	\$ 164,13	\$ 606,45
510	\$ 14,30	\$ 40,83	\$ 10,18	\$ 164,09	\$ 606,41
530	\$ 14,30	\$ 40,83	\$ 10,18	\$ 164,04	\$ 606,37
550	\$ 14,30	\$ 40,83	\$ 10,18	\$ 164,00	\$ 606,34

Elaboración propia

Del análisis de sensibilidad se observa que con syngas se sigue teniendo el costo de operación más alto, incluso para mayores tamaños del sistema, a pesar de que este costo disminuye conforme lo hace la capacidad de los equipos, la segunda fuente más costosa es el biogás que además tiene la particularidad de que el costo disminuye rápidamente al aumentar la

capacidad del sistema, lo cual hace que sea una viable su escalabilidad para mayores tamaños de planta, en el rango de tamaños evaluados los menores costos se alcanzan siempre con energía solar fotovoltaica. Los costos del sistema operando con energía eléctrica, GLP y energía solar están fuertemente impactados por los costos de los equipos, en cuanto al biogás y syngas el impacto es más bajo, esto combinado con los costos relativamente bajos de materia prima hacen que al aumentar la capacidad del sistema se obtengan costos más bajos.

19. Conclusiones

De las fuentes renovables evaluadas las de mayor potencial energético parecen ser el biogás y la energía eléctrica, el biogás presenta un alto poder calorífico y alta disponibilidad de material ruminal en el departamento de Córdoba con el que se puede producir. Por su parte la de energía solar muestra que Córdoba presentando valores irradiancias entre 4,5 y 5 kWh/m²/día, que podría aprovecharse en sistemas de refrigeración residencial por medio del ciclo de absorción, aunque solo permitiría su operación entre 6,5 y 7,6 horas por día, lo que aumenta con el uso de baterías.

El análisis energético del sistema indica que la fuente renovable de mejor desempeño es el biogás, alcanzando valores del COP comparables con las fuentes para las que fue diseñado el equipo (GLP y Electricidad), esto se debe a que el contenido energético de este combustible logra aumentar de forma rápida la temperatura de la solución refrigerante en el generador. En el desempeño exergético global se ratifica que el biogás es la fuente de mejor desempeño, superando a las fuentes no renovables evaluadas, esto se debe a la poca exergía química destruida en el proceso de biodigestión.

El análisis de los costos indica que económicamente la mejor fuente renovable de energía es la solar, por sus menores costos de inversión. Otras tecnologías, requieren de una inversión inicial alta que las fuentes convencionales, en cuanto a la tecnología de gasificación de biomasa, esta presentó los más altos costos, fuertemente impactados por la inversión inicial, en contraste el biogás muestra costos más bajos y mayor escalabilidad.

Teniendo en cuenta los aspectos de desempeño, de operación y económicos se recomienda el uso de la energía solar, debido a su bajo costo, facilidad de operación y alto desarrollo de la tecnología, es de resaltar que el biogás presenta los mejores desempeños, sin

embargo, implica altos costos y complejidad en la operación, ya que estos sistemas requieren de monitoreo y control en el proceso de producción del gas combustible.

20. Recomendaciones

- Realizar la optimización de los sistemas de refrigeración por absorción con cada fuente renovable, buscando obtener un diseño particular del sistema para dicha fuente.
- Para la implementación de gases combustibles se recomienda rediseñar el quemador del equipo para adaptarlo a las condiciones de flujo reactivo de cada combustible.
- Se recomienda evaluar la utilización de intercambiadores de calor compactos para mejorar los procesos de transferencia de calor y disminuir la inercia térmica del equipo.
- Estudiar otras tecnologías de aprovechamiento como la combustión directa de biomasa y la energía solar térmica.
- Para vencer rápidamente la inercia térmica se puede equipar al equipo con baterías que suministren la energía al inicio del proceso y luego de alcanzado el régimen estable, entre a actuar la fuente renovable.
- Evaluar alternativas de cogeneración donde se aprovecha en el refrigerador calores residuales de procesos de generación de energía principalmente con fuentes renovable.

Referencias

- Acuña, A., Velázquez, N., & Cerezo, J. (2013). Energy analysis of a diffusion absorption cooling system using lithium nitrate, sodium thiocyanate and water as absorbent substances and ammonia as the refrigerant. *Applied Thermal Engineering*, *51*(1–2), 1273–1281. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.10.046>
- Al-Nimr, M. A., & Mugdadi, B. (2020). A hybrid absorption/thermo-electric cooling system driven by a concentrated photovoltaic/thermal unit. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *40*, 100769. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100769>
- Aman, J., Ting, D. S. K., & Henshaw, P. (2014). Residential solar air conditioning: Energy and exergy analyses of an ammonia–water absorption cooling system. *Applied Thermal Engineering*, *62*(2), 424–432. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.10.006>
- Amaris, C., Vallès, M., & Bourouis, M. (2018). Vapour absorption enhancement using passive techniques for absorption cooling/heating technologies: A review. *Applied Energy*, *231*, 826–853. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.09.071>
- Anukam, A. I., Goso, B. P., Okoh, O. O., & Mamphweli, S. N. (2017). Studies on Characterization of Corn Cob for Application in a Gasification Process for Energy Production. *Journal of Chemistry*, *2017*, 6478389. <https://doi.org/10.1155/2017/6478389>
- Asadi, J., Amani, P., Amani, M., Kasaeian, A., & Bahiraei, M. (2018). Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of absorption cooling system driven by various solar collectors. *Energy Conversion and Management*, *173*(August), 715–727. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.013>

ASTM D3172-13. (2013). *Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke*.

<https://doi.org/10.1520/D3172-13>

ASTM D3173 / D3173M-17a. (2017). *Standard Test Method for Moisture in the Analysis*

Sample of Coal and Coke. https://doi.org/10.1520/D3173_D3173M-17A

ASTM D3174-12. (2018). *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and*

Coke from Coal. <https://doi.org/10.1520/D3174-12R18E01>

ASTM D3177-02. (2007). *Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of*

Coal and Coke (Withdrawn 2012). <https://doi.org/10.1520/D3177-02R07>

ASTM D4239-18. (2018). *Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and*

Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion. <https://doi.org/10.1520/D4239-18E01>

ASTM D5373-16. (2016). *Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and*

Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke.

<https://doi.org/10.1520/D5373-16>

ASTM D5865 / D5865M-19. (2019). *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal*

and Coke. https://doi.org/10.1520/D5865_D5865M-19

Balafkandeh, S., Zare, V., & Gholamian, E. (2019). Multi-objective optimization of a tri-

generation system based on biomass gasification/digestion combined with S-CO₂ cycle and absorption chiller. *Energy Conversion and Management*, 200, 112057.

<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112057>

Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*

(Third Edit). Elsevier Science. <https://books.google.com.co/books?id=BYM2DwAAQBAJ>

Bejan, A. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley.

<https://books.google.com.co/books?id=j0zSDAAAQBAJ>

Bellos, E., Tzivanidis, C., Symeou, C., & Antonopoulos, K. A. (2017). Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven absorption chiller – A dynamic approach. *Energy Conversion and Management*, 137, 34–48.

<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.01.041>

Ben Ezzine, N., Garma, R., & Bellagi, A. (2010). A numerical investigation of a diffusion-absorption refrigeration cycle based on R124-DMAC mixture for solar cooling. *Energy*, 35(5), 1874–1883. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.032>

Ben Ezzine, N., Garma, R., Bourouis, M., & Bellagi, A. (2010). Experimental studies on bubble pump operated diffusion absorption machine based on light hydrocarbons for solar cooling. *Renewable Energy*, 35(2), 464–470. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.026>

Cacua, K., Olmos-Villalba, L., Herrera, B., & Gallego, A. (2016). Experimental evaluation of a diesel-biogas dual fuel engine operated on micro-trigeneration system for power, drying and cooling. *Applied Thermal Engineering*, 100, 762–767.

<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.02.067>

Calise, F., Libertini, L., & Vicidomini, M. (2017). Design and optimization of a novel solar cooling system for combined cycle power plants. *Journal of Cleaner Production*.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.157>

Chejne, F., Valdés, C., Marrugo, G., Gómez, C., Montoya, J., Macías, R., Londoño, C., De La

- Cruz, J., Ocampo, A., & Arenas, E. (2017). *La gasificación, alternativa de generación de energía y productos con alto valor agregado para la industria*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Costa, V. A. F., Tarelho, L. A. C., & Sobrinho, A. (2019). Mass, energy and exergy analysis of a biomass boiler: A portuguese representative case of the pulp and paper industry. *Applied Thermal Engineering*, 152(January), 350–361.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.033>
- Dayton, D. C., & Foust, T. D. (2020). Chapter Two - Biomass Characterization. In D. C. Dayton & T. D. Foust (Eds.), *Analytical Methods for Biomass Characterization and Conversion* (pp. 19–35). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815605-6.00002-0>
- de Jong, W., & van Ommen, J. R. (2014). *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future: Fundamentals of Conversion Processes*. Wiley.
<https://books.google.com.co/books?id=gm8TBwAAQBAJ>
- de Kuyper, J. C. V., & Morales, S. R. (2014). *Fuentes de energía, renovables y no renovables: aplicaciones*. Alfaomega. <https://books.google.com.co/books?id=-P78jgEACAAJ>
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2007). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier Science. <https://books.google.com.co/books?id=ruR7U3IjrR0C>
- DNP Colombia. (2016). Pérdida y Desperdicio de alimentos en Colombia: Estudio de la Dirección de Seguimiento y Evaluación de Políticas Públicas. *Departamento Nacional de Planeación*.
- El Haj Assad, M., Nazari, M. A., Ehyaei, M. A., & Rosen, M. A. (2021). Heat pumps and

- absorption chillers. In *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems* (pp. 163–180). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821602-6.00013-4>
- Fao. (2012). Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención. In *Roma*. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.562>
- Fenalce. (2020). *Maíz para Colombia, visión 2030*. Www.Fenalce.Org. <https://www.fenalce.org/alfa/pg.php?pa=1>
- Fuess, L. T., & Garcia, M. L. (2017). Anaerobic biodigestion for enhanced bioenergy generation in ethanol biorefineries: Understanding the potentials of vinasse as a biofuel. In *Bioenergy Systems for the Future: Prospects for Biofuels and Biohydrogen* (pp. 149–183). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101031-0.00005-3>
- Gamarra Quintero, J. S., Gonzalez, C. A. D., & Pacheco Sandoval, L. (2021). Exergoeconomic analysis of a simulated system of biomass gasification-based power generation with surplus syngas storage in a rural zone in Colombia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101075. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101075>
- Gebrehawariat, E., Animut, G., Urge, M., & Mekasha, Y. (2016). Sun-Dried Bovine Rumen Content (SDRC) as an Ingredient of a Ration for White Leghorn Layers. *East African Journal of Sciences*, 10(1), 29–40.
- Gomez, R. D., Palacio, M., Arango, J. F., Avila, A. E., & Mendoza, J. M. (2021). Evaluation of the energy generation potential by an experimental characterization of residual biomass blends from Córdoba, Colombia in a downdraft gasifier. *Waste Management*, 120, 522–529. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.014>

IDEAM. (2020). *Atlas de radiación solar*. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

IPSE. (2020). *Caracterización energética de zonas no interconectadas* (Vol. 2).

<https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/>

Isaza, C., Pilatowsky, I., Romero, R., & Cortés, F. (2010). Análisis termodinámico de un sistema de refrigeración solar por absorción usando soluciones de Monometolamina - agua para la conservación de alimentos. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8, 18–25. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612010000100003&nrm=iso

ISO 562-10. (2010). *specifies a method of determining the volatile matter of hard coal and of coke*. <https://www.iso.org/standard/55943.html>

Lazzarin, R. M., & Noro, M. (2018). Past, present, future of solar cooling: Technical and economical considerations. *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.055>

León Mejía, J. M., & Novoa Posada, A. L. (2018). *Evaluación del rendimiento energético del biogás de estiércol bovino empleando la tecnología mci en ciclo otto y diésel para la generación de potencia en el departamento de Córdoba*. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/668>

Lesme, R. L., Martillo, J., & Oliva, L. (2020). *Estudio de la gasificación de la tusa del maíz para la generación de electricidad Study of the corn cob gasification of the for the electricity generation Métodos y Materiales*. 23(3), 1–9.

Li, X., Kan, X., Sun, X., Zhao, Y., Ge, T., Dai, Y., & Wang, C. H. (2019). Performance analysis of a biomass gasification-based CCHP system integrated with variable-effect LiBr-H₂O

absorption cooling and desiccant dehumidification. *Energy*, 176, 961–979.

<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.04.040>

López, A. R., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Montoya, F. C., Oberländer, N., & Oei, P. Y. (2020). Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. *Renewable Energy*, 148, 1266–1279.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>

López González, L. M., Pereda Reyes, I., Escobar Román, R., Pedraza Garciga, J., & Romero Romero, O. (2018). Efecto de la aplicación de métodos de pre-tratamientos en el proceso de digestión anaerobia de la biomasa lignocelulósica. *Tecnología Química*, 38(2), 324–334.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

[61852018000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Macriss, R A; Gutraj, J M; Zawacki, T. S. (1988). *Absorption fluids data survey: Final report on worldwide data*. <https://doi.org/AC05-84OR21400>

Mansouri, R., Bourouis, D. M., & Dr. Ahmed Bellagi. (2016). *ABSORPTION / DIFFUSION REFRIGERATING MACHINES USING AMMONIA AS A REFRIGERANT : SIMULATION UNDER STEADY-STATE AND DYNAMIC REGIMES The eoretic cal and d experim ental stud dy of a absorpt ion an nd abs orption n / diffus sion re efrigera ating m machin e*.

Universitat Rovira I Virgili.

Martillo Aseffe, J. A., Martínez González, A., Jaén, R. L., & Silva Lora, E. E. (2021). The corn cob gasification-based renewable energy recovery in the life cycle environmental performance of seed-corn supply chain: An Ecuadorian case study. *Renewable Energy*, 163,

1523–1535. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.053>

- Mendoza, J., Rhenals-Julio, J., Avila, A., & Durando, E. (2021). *Análise Exergoeconômica da Gasificação de Sabugo de Milho Integrado em um Sistema de Geração de Energia: Estudo de Caso na Colômbia*. 76, 1–7.
- Ministerio de minas y energías. (2016). *Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022*. http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI_PROURE_2017_2022.pdf
- Moharramian, A., Soltani, S., Rosen, M. A., Mahmoudi, S. M. S., & Jafari, M. (2019). Conventional and enhanced thermodynamic and exergoeconomic analyses of a photovoltaic combined cycle with biomass post firing and hydrogen production. *Applied Thermal Engineering*, 160, 113996. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113996>
- Molina, G., Gupta, V. K., Singh, B. N., & Gathergood, N. (2020). *Bioprocessing for Biomolecules Production*. Wiley. <https://books.google.com.co/books?id=Eb64DwAAQBAJ>
- Neveras triviales. (2021). *No Title*. <https://www.serviciodometricwaeco.com/neveras-trivalentes-f8.html>
- Nikbakhti, R., Wang, X., Hussein, A. K., & Iranmanesh, A. (2020). Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 707–738. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2020.01.036>
- Olaya, Y., & Gonzalez, L. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. In *Universidad nacional de Colombia* (Vol. 51, Issue 2). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- OPUREB&DANM. (2016). *Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba*,

Caribe.

Palencia-Severiche, G., Mercado-F, T., & Combath-Caballero, E. (2006). Estudio agroclimático de Córdoba. In *Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Córdoba. Montería, Colombia.*

Querol, E., Gonzalez-Regueral, B., & Perez-Benedito, J. L. (2012). *Practical Approach to Exergy and Thermo-economic Analyses of Industrial Processes.* Springer London.
<https://books.google.com.co/books?id=d8BPo78kjocC>

Razmi, A. R., & Janbaz, M. (2020). Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management, 204*, 112320.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112320>

REN21. (2017). Ren 21 - Renewable Global Futures Report. Great debates towards 100 % renewable energy. *Ren21*. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1918.217382>

Rhenals, J. D., & Torres, M. L. (2016). *ANÁLISIS EXERGOECONÓMICO DE LA GASIFICACIÓN DE TUSA DE MAÍZ EMPLEANDO VAPOR DE AGUA COMO AGENTE GASIFICANTE, INTEGRADO A UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA.*
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/669>

Rodríguez-Muñoz, J. L., & Belman-Flores, J. M. (2014). Review of diffusion-absorption refrigeration technologies. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 30, pp. 145–153). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.019>

Rokni, M. (2018). Design and analysis of a waste gasification energy system with solid oxide

fuel cells and absorption chillers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(11), 5922–5938. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.10.123>

Sagastume, A., Mendoza, J. M., Cabello, J. J., & Rhenals, J. D. (2021). *The Available Waste-to-energy Potential from Agricultural Wastes in the Department of Córdoba , Colombia*. 11(3), 44–50.

Sakirkin, S., Morgan, C., Macdonald, J., & Auvermann, B. (2011). Effect of Diet Composition on the Determination of Ash and Moisture Content in Solid Cattle Manure Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 65, 1056–1061. <https://doi.org/10.1366/11-06333>

Sayadi, Z., Ben Thameur, N., Bourouis, M., & Bellagi, A. (2013). Performance optimization of solar driven small-cooled absorption-diffusion chiller working with light hydrocarbons. *Energy Conversion and Management*, 74, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.029>

Secretaría de desarrollo economico de Córdoba. (2018). *Evaluaciones agropecuarias municipales. Gobernación de Córdoba*.

Sevinchan, E., Dincer, I., & Lang, H. (2019). Energy and exergy analyses of a biogas driven multigenerational system. *Energy*, 166, 715–723. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.10.085>

Shariff, A., Mohamad Aziz, N. S., Ismail, N. I., & Abdullah, N. (2016). Corn Cob as a Potential Feedstock for Slow Pyrolysis of Biomass. *Journal of Physical Science*, 27(2), 123–137. <https://doi.org/10.21315/jps2016.27.2.9>

Siddiki, S. Y. A., Uddin, M. N., Mofijur, M., Fattah, I. M. R., Ong, H. C., Lam, S. S., Kumar, P. S., & Ahmed, S. F. (2021). Theoretical calculation of biogas production and greenhouse gas emission reduction potential of livestock, poultry and slaughterhouse waste in Bangladesh. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105204.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105204>

SIEL. (2017). *Cobertura de Energía Eléctrica a 2016*.

<http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturaDelSistemaInterconectadoNacional/ConsultasEstadisticas/tabid/81/Default.aspx>

SIEL. (2018). *Indice de cobertura de energía eléctrica*.

<http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturaDelSistemaInterconectadoNacional/ConsultasEstadisticas/tabid/81/Default.aspx>

Silva, S. R., Bonanato, G., Costa, E. F. da, Sarrouh, B., & Costa, A. O. S. da. (2021). Specific chemical exergy prediction for biological molecules using hybrid models. *Chemical Engineering Science*, 235, 116462. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116462>

Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (2021). *Balance energético Colombiano*.

Balance Energético Colombiano.

<http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/PETROLEO.aspx>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia. In *Unidad de Planeación Minero Energética*.

http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2016). Boletín Estadístico de Minas y

energía 2012 – 2016. *Ministerio de Minas y Energía*.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Vazini Modabber, H., & Khoshgoftar Manesh, M. H. (2021). 4E dynamic analysis of a water-power cogeneration plant integrated with solar parabolic trough collector and absorption chiller. *Thermal Science and Engineering Progress*, *21*, 100785.

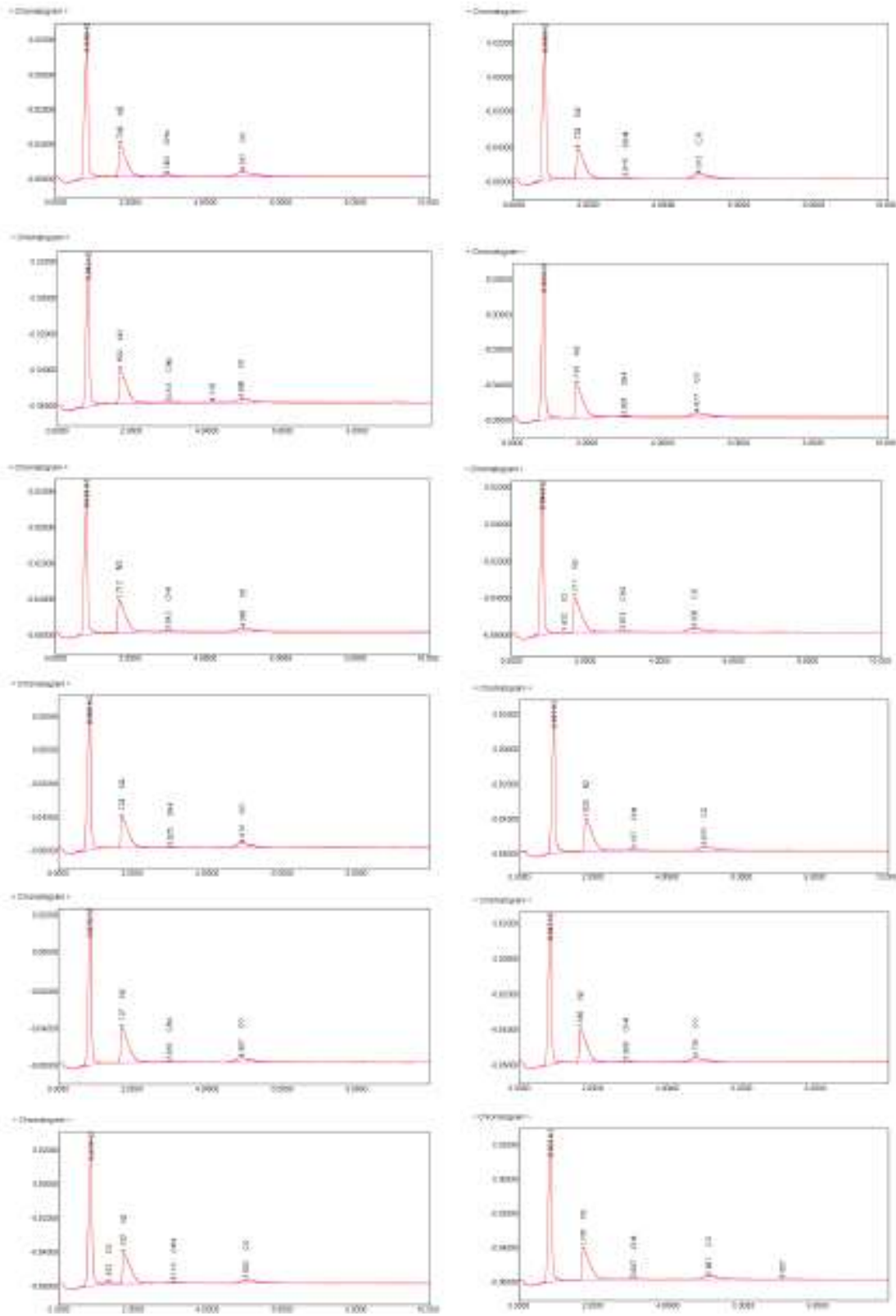
<https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2020.100785>

Yildiz, A., & Ersöz, M. A. (2013). Energy and exergy analyses of the diffusion absorption refrigeration system. *Energy*, *60*, 407–415. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.07.062>

Yildiz, A., Ersöz, M. A., & Gözmen, B. (2014). Effect of insulation on the energy and exergy performances in Diffusion Absorption Refrigeration (DAR) systems. *International Journal of Refrigeration*, *44*, 161–167. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2014.04.021>

Anexos

Anexo I: Resultados del análisis de cromatografía de gases de gasificación



Anexo III: Registro fotográfico de los experimentos



Fuente: El autor