

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE
REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN HÍBRIDO EMPLEANDO UN KIT
SOLAR FOTOVOLTAICO Y BIOGÁS DE UN BIODIGESTOR**



JOHAN SEBASTIÁN CASTELLANOS ÁVILA

ALDAIR LOZANO MUÑOZ

DIRECTOR

Ing. JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO, Ph. D

CO-DIRECTOR

Ing. ARNOLD RAFAEL MARTÍNEZ GUARÍN, M.Sc

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA - CÓRDOBA

2020

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE
REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN HÍBRIDO EMPLEANDO UN KIT
SOLAR FOTOVOLTAICO Y BIOGÁS DE UN BIODIGESTOR**

JOHAN SEBASTIÁN CASTELLANOS ÁVILA

ALDAIR LOZANO MUÑOZ

**Trabajo de grado presentado en la modalidad de trabajo de investigación como
parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

DIRECTOR

Ing. JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO, Ph. D

CO-DIRECTOR

Ing. ARNOLD RAFAEL MARTÍNEZ GUARÍN, M.Sc

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA - CÓRDOBA

2020

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO

Director

RAFAEL DAVID GÓMEZ VÁSQUEZ

Jurado

MARIO ANDRÉS PALACIO VEGA

Jurado

DEDICATORIAS

Agradecimientos especial a:

Dios por guiarnos por el buen camino, darnos fuerza para seguir adelante y afrontar las dificultades y principalmente brindarnos unos padres que siempre se preocuparon por nuestro bienestar, gracias por su cariño, amor incondicional, enseñarnos buenos valores y por todos los esfuerzos que hacían a diario para que no nos faltara nada.

Gracias a nuestros hermanos, primos, y toda la familia que siempre se ha preocupado por nosotros y hemos encontrado en ellos un apoyo en los momentos difíciles.

Gracias de todo corazón a nuestro director el ingeniero Jorge Mario Mendoza Fandiño por brindarnos todo el apoyo, paciencia, motivación y conocimiento para culminar este proyecto. Gracias al ingeniero Rafael Gómez por encaminarnos en la línea de investigación. Gracias también a los ingenieros Arnold Martínez y Mario Palacios por estar siempre presente ante cualquier dificultad que se nos presentaba y mostrarnos el camino para buscar una solución. Gracias a todos los profesores de la facultad por habernos enseñado a amar la Ingeniería Mecánica, esperamos siempre que estén orgullosos.

Gracias al ingeniero Juan Fernando Arango y Jesús Rhenals por el apoyo técnico, logístico y por compartir su conocimiento con nosotros, fueron de gran ayuda sus recomendaciones. Por último, gracias a nuestros compañeros que durante todo este trayecto de nuestra formación como profesionales siempre contábamos con ellos a Carlos Antonio Medellín, Samuel Bonilla, Taylor de la Vega, Juan Morgan.

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

Los autores agradecen 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. FQ-05-17 de 2019".

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
3.1 GENERALIDADES DE LA BIOMASA.....	17
3.2 BIOGÁS	18
3.2.1 Análisis de composición por medio de cromatografía de gases	19
3.3 KIT SOLAR FOTOVOLTAICO INTEGRADO EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DE POTENCIA	21
3.4 ELEMENTOS DE UN KIT SOLAR FOTOVOLTAICO.....	22
3.5 REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN	23
3.6 COEFICIENTE DE RENDIMIENTO (COP).....	25
3.7 REFRIGERANTE DEL SISTEMA	27
4. MATERIALES Y MÉTODOS	28

4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	28
4.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS A MEDIR	28
4.3 PROCESO DE MEDICIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN EL EQUIPO	29
4.4 CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS POR MEDIO DE LA CROMATOGRAFÍA DE GASES	31
4.5 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN NECESARIA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	33
4.6 CÁLCULO DE LAS HORAS SOLARES PICO.....	34
4.7 REALIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS PRUEBAS	36
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
5.1 ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS.....	38
5.2 HORAS PICO SOLAR PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA NEVERA CON EL KIT SOLAR FOTOVOLTAICO.....	45
5.3 OBTENCIÓN DE LA INCLINACIÓN ÓPTIMA.....	46
5.4 RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL.....	47
5.5 OBTENCIÓN DEL FACTOR DE IRRADIANCIA (FI)	49
5.6 OBTENCIÓN DE LAS HORAS SOL PICO DIA (HSP).....	50
5.7 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN NECESARIA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.	50
5.8 HORAS DE RESPALDO DE LA BATERÍA	51
5.9 CÁLCULO DEL TIEMPO DE OPERACIÓN OPTIMO DEL EQUIPO	52
6. CONCLUSIONES	54
7. RECOMENDACIONES.....	55
8. BIBLIOGRAFÍA.....	56
9. ANEXOS.....	59

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Composición bioquímica de un biogás.....	19
Tabla 2. Resultados de la cromatografía.....	39
Tabla 3. Composición H70-CR30.....	39
Tabla 4. Declinación solar entre los años 2015 y 2016.....	46
Tabla 5. Inclinação optima entre los años 2015 y 2016.....	47
Tabla 6. Radiación global horizontal.....	48
Tabla 7. Factor de irradiación entre los años 2015 y 2016.....	49
Tabla 8. Horas solar pico por día entre los años 2015 a 2016.....	50

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un cromatógrafo de gases.....	21
Figura 2. Elemento de un kit solar fotovoltaico.....	22
Figura 3. Ciclo de refrigeración por absorción amoníaco-agua.....	24
Figura 4. Nevera con sistema de refrigeración por absorción.....	29
Figura 5. Partes del sistema de refrigeración por absorción.	29
Figura 6. Puntos propuestos para la medición de temperaturas.	30
Figura 7. Ficha técnica de la nevera.....	30
Figura 8. Biodigestores con biogás.....	31
Figura 9. Gráfico del sistema de biodigestores.....	32
Figura 10. Cromatógrafo UPB sede Montería.	32
Figura 11. Realización de la cromatografía con el biogás.	33
Figura 12. Gráfico propuesto para el cálculo de las HSP.	35
Figura 13. Ficha técnica del kit solar fotovoltaico.....	35
Figura 14. Gráfico del generador fotovoltaico.....	36
Figura 15. Batería acoplada al panel. Fuente: Propia	36
Figura 16. Pruebas con la nevera. Fuente: Propia.....	37
Figura 17. Generación de flama en el quemador.	37
Figura 18. Cromatografía Gas patrón.	38
Figura 19. Cromatografía biogás.	39
Figura 21. Radiación horizontal promedio entre los años 2015 y 2016.	48
Figura 22. Radiación vs horario de exposición solar del equipo.	52
Figura 23. Grafica del tiempo óptimo de operación del equipo.....	53

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Cromatografías de las diferentes pruebas realizadas.....	59
Anexo 2. Resultados prueba biogas H70-CR30 en la nevera.	62

RESUMEN

En zonas donde no hay acceso a un suministro de energía (ZNI) o en su defecto la calidad de esta es demasiado baja para alimentar los sistemas de refrigeración convencionales, el uso de un sistema de refrigeración por absorción híbrido puede ser una alternativa viable. Es bien sabido que no se han implementado estrategias de integración energética con equipos comerciales, que busquen mejorar las prestaciones de estos equipos en zonas no interconectadas, en este trabajo se aprovechó la energía solar y la conversión bio-química de biomasa (biogás) a partir de biodigestores para alimentar equipos de refrigeración como una alternativa para mitigar la demanda de energía promoviendo la generación energética limpia basadas en el aprovechamiento de fuentes no convencionales. Además, se busca aumentar la calidad de vida y competitividad del sector agrícola. En un sistema de refrigeración por absorción el ciclo resulta físicamente más complejo, además es necesario utilizar una mezcla binaria, generalmente amoníaco y agua como refrigerante en lugar del componente único utilizado habitualmente en el ciclo de compresión de vapor, en estos sistemas se pueden disponer de diferentes fuentes de energía para su funcionamiento ya que en general no se requieren temperaturas elevadas para que el sistema funcione de manera adecuada. Se realizó un estudio cromatográfico del biogás usado para analizar sus componentes, también se calculó la relación aire-combustible y poder calorífico entregado con el fin de obtener características energéticas que se puedan comparar con sistemas convencionales. Se estimó la cantidad de horas sol pico (HSP) a partir de datos recolectados en la ciudad de Montería del departamento de Córdoba, se desarrolló un método experimental que consistió en mensurar la temperatura en 5 puntos esenciales del sistema utilizando 5 termopares tipo k para tuberías y 1 termopar en 1 litro

de agua dentro del refrigerador. Considerando que la composición de la biomasa afectaría el rendimiento del sistema de refrigeración como también las propiedades fisicoquímicas, agente oxidante, tipo de conversión y condiciones de funcionamiento, se realizó un estudio del comportamiento del equipo utilizado teniendo en cuenta las variables a evaluar y las características de las fuentes energéticas implementadas en el mismo.

Palabras Claves: Biogás, biomasa, refrigerante, biodigestores, absorción.

ABSTRACT

In areas where there is no access to a power supply (ZNI) or if its quality is not too low to power conventional refrigeration systems, the use of a hybrid absorption refrigeration system may be a viable alternative. It is well known that energy integration strategies have not been implemented with commercial equipment, seeking to improve the performance of this equipment in non-interconnected areas. In this work, solar energy and the biochemical conversion of biomass (biogas) from of biodigesters to feed refrigeration equipment as an alternative to mitigate energy demand by promoting clean energy generation based on the use of unconventional sources. In addition, it seeks to increase the quality of life and competitiveness of the agricultural sector. In an absorption refrigeration system the cycle is physically more complex, in addition it is necessary to use a binary mixture, generally ammonia and water as a refrigerant instead of the single component usually used in the steam compression cycle, in these systems it is possible to have different energy sources for its operation since, in general, high temperatures are not required for the system to function properly. A chromatographic study of the biogas used to analyze its components was carried out, the air-fuel ratio and the calorific value delivered were also calculated in order to obtain energy characteristics that can be compared with conventional systems. The amount of peak sun hours (HSP) was estimated from data collected in the city of Monteria in the department of Córdoba, an experimental method was developed that consisted of measuring the temperature at 5 essential points of the system using 5 type K thermocouples for pipes and 1 thermocouple in 1 liter of water inside the refrigerator. Considering that the composition of the biomass would affect the performance of the refrigeration system as well as the physicochemical properties, oxidizing agent, type of conversion and operating conditions, a study of the behavior of the equipment used was carried out taking into account the variables to be evaluated and the characteristics of the energy sources implemented in it.

Keywords: Biogas, biomass, refrigerant, biodigesters, absorption.

1. INTRODUCCIÓN

La propuesta energética que se plantea es el resultado de una evaluación rigurosa de la necesidad de mejorar las prestaciones de los sistemas de conservación de alimentos en las zonas no interconectadas (ZNI). En Colombia, de acuerdo con el ministerio de minas y energía, entre y 39% y 50% del consumo de energía eléctrica, de los hogares en Colombia está asociado a procesos de refrigeración de alimentos (Ministerio de Minas y Energía, 2009). Por otra parte el sistema interconectado nacional (SIN) abarca sólo el 34% del territorio nacional, donde habita el 96% de la población colombiana, registrando una cobertura nacional del 96,38% (SIEL, 2015), sin embargo las zonas no interconectadas (ZNI), tienen una cobertura que oscila entre el 45 y 77%, con un servicio caracterizado por un alto costo de prestación y mala calidad, esto se evidencia bajo los siguientes dos indicadores; horas promedio de prestación de servicio 4-8 horas/diarias y costo promedio de la energía \$1200/kWh (Cadena & Grupo de Cobertura y ZNI, 2012).

Queda en evidencia que el territorio considerado como ZNI normalmente es rural, y en 2014, el área agrícola sembrada cerró en 4,9 millones de hectáreas con 27 millones de toneladas de producto agrícola y 4,1 millones de toneladas en producción pecuaria lo que representa un 6,8% del PIB nacional (Minagricultura, 2015), (DANE., 2015).

La biomasa es una alternativa que nos proporciona ayudas, ya que sus residuos se vuelven una fuente de calor o electricidad, lo cual es un ahorro en términos de costos energéticos. No obstante, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y ayuda a cumplir las normatividades ambientales internacionales que tienen como compromiso los países frente al cambio climático. Este tipo de alternativas promueve la independencia a los

servicios privados de electricidad y ofrece la oportunidad de tener flexibilidad y acceso energético. Además, para las zonas no interconectadas y áreas rurales puede verse como la oportunidad de acceder a la electricidad y desarrollo de estas poblaciones vulnerables y marginadas.

Esto hace que el uso de biogás y la energía solar como fuentes alternativas de energía para alimentar sistemas de refrigeración por absorción en zonas no interconectadas sea pertinente, de otra forma, se estaría desperdiciando un alto potencial de energía. Por otra parte, la refrigeración de alimentos se ha convertido en uno de los procesos fundamentales de nuestra cadena de producción alimenticia.

El territorio considerado como ZNI normalmente es rural y son zonas vulnerables al conflicto, las oportunidades de aprovechamiento de sus recursos naturales hacen que sigan estando como prioridad, mecanismos y proyectos que buscan promover su desarrollo y mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Un sistema de refrigeración por absorción es un medio para producir frío, y que al igual que un sistema de refrigeración por compresión, aprovecha la absorción de calor a partir del cambio de estado de una sustancia, líquido a gaseoso. Así como en el sistema de compresión el ciclo se hace mediante un compresor, en el caso de la absorción, el ciclo aprovecha la capacidad que tiene el agua de absorber otra sustancia, como es el caso del amoníaco, en fase de vapor. (Yunus A. Cengel 7 edición, 2012).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño energético de un sistema de refrigeración por absorción híbrido acoplado a un kit solar fotovoltaico y a un biodigestor con miras a su implementación en zonas no interconectadas (ZNI).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las variables que influyen en el rendimiento del sistema de refrigeración por absorción híbrido acoplado a un sistema solar fotovoltaico y un biodigestor.
- Establecer las características Termo-Energéticas del biogás producto del tratamiento de la biomasa para identificar las variaciones producidas en el ciclo de refrigeración.
- Desarrollar un método experimental que permita evaluar el COP del equipo implementando el biogás.
- Determinar la irradiación solar necesaria del kit solar fotovoltaico con la cual se generó la potencia requerida para el funcionamiento del sistema.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 GENERALIDADES DE LA BIOMASA

La energía de biomasa es la fuente energética con mayor explotación en la última década, dado que aproximadamente más del 80% de la energía consumida proviene de la biomasa fósil, formada hace millones de años a partir de la sedimentación de materia orgánica en los combustibles de uso actual como es el caso del petróleo, el carbón y el gas natural; y toda esta destinada al sector vehicular, sector industrial, y al sector residencial y comercial (Carta, et al., 2009; IEA, 2010; World Energy Council, 2013). Además, se proyecta que el uso de estas fuentes no disminuirá considerablemente para las próximas décadas, aun cuando se masifica la explotación de fuentes energéticas no renovables (IEA, 2010; World Energy Council, 2013).

En un contexto energético, como el actual se hace referencia a un grupo de materia orgánica proveniente de heces de animales del sector primariamente agrícola con sus residuos, derivados y subproductos, que pueden ser aprovechados para obtener energía en distintas presentaciones a través de distintos procesos tecnológicos. Así, teniendo en cuenta esta perspectiva es atractivo aprovechar los residuos orgánicos abundantes que son desechados de actividades como la agricultura y convertirlos en una fuente de energía que pueda ser transformada mediante los diferentes procesos termoquímicos, bioquímicos, químicos o térmicos en un producto factible para la sociedad (Carta, et al., 2009; Basu, 2010).

3.2 BIOGÁS

El biogás se puede considerar como una mezcla gaseosa producto de un proceso de biodigestión anaeróbica con materiales orgánicos, dicha mezcla este compuesta en gran porcentaje por metano y dióxido de carbono obtenido de un ambiente con una cantidad de oxígeno casi nula, no obstante, este proceso no evita que se produzcan impurezas dentro de la composición de este. La composición depende del material digerido y del funcionamiento del proceso anaeróbico, cuando el biogás supera un contenido al 45% se caracteriza por ser inflamable (Manual de biogás FAO 2011).

Esto supone una oportunidad para las zonas rurales, no interconectadas y marginadas, pues se esta abasteciendo de un suministro de gas o de electricidad fuera del sector privado, y todo esto gracias a la materia orgánica del entorno, sin dejar de lado que la producción de biogás no tiene dependencia en las condiciones climáticas y sobre todo es un proceso sin riesgos lo cual es algo positivo para la comunidad, dada la seguridad de todo este proceso (Factorenergía 2017). En la tabla 1 se encuentran los componentes de un biogás.

Tabla 1. Composición bioquímica de un biogás.

Componente	Fórmula	Porcentaje (%)
Metano	CH_4	40-70
Dióxido de carbono	CO_2	30-60
Hidrogeno	H	0,1
Nitrógeno	N	0,5
Monóxido de carbono	CO	0,1
Oxígeno	O_2	0,1
Sulfuro de hidrógeno	H_2S	0,1

3.2.1 Análisis de composición por medio de cromatografía de gases

La cromatografía de gases (GC) es una técnica analítica de uso muy extendido. Empleado para determinar la composición de una mezcla de productos químicos (muestra), un cromatógrafo de gases utiliza diversos gases en su operación en función del analizador y del tipo de detector concretos. El uso del gas especial y el equipo correctos cuando realice una cromatografía de gases mejorará considerablemente la precisión de los resultados analíticos (<https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio>).

La cromatografía es básicamente una técnica de separación, su gran capacidad para resolver muestras complejas ha conducido a utilizarla cada vez más como técnica analítica. Esta utilización, ha conducido al desarrollo de una instrumentación, que, utilizando siempre la separación por elución, puede operar en continuo, con mayor eficacia en la separación y con un mayor control de las condiciones cromatográficas para incrementar la reproducibilidad de los resultados.

Entre las técnicas cromatográficas utilizadas con fines analíticos, la cromatografía de gases es probablemente la técnica de más amplia utilización; ninguna técnica analítica puede ofrecer su capacidad de separación o su sensibilidad a la hora de analizar

compuestos volátiles. Por otra parte, el hecho de que con esta técnica las mezclas sean separadas en fase gaseosa, establece los límites de su utilización, que estarán marcados fundamentalmente por la estabilidad térmica de los compuestos a separar. Por lo general, la utilización de la cromatografía de gases está restringida a la separación de compuestos con un peso molecular menor de 1000 a una temperatura máxima de trabajo de aproximadamente 400 °C; dentro de estos límites, como ya se ha mencionado, la única limitación existente será la estabilidad térmica de la muestra.

Para realizar una separación mediante cromatografía de gases, se inyecta una pequeña cantidad de la muestra a separar en una corriente de un gas inerte a elevada temperatura; esta corriente de gas, atraviesa una columna cromatográfica que separará los componentes de la mezcla por medio de un mecanismo de partición (cromatografía gas líquido), de adsorción (cromatografía gas sólido) o, en muchos casos, por medio de una mezcla de ambos. Los componentes separados, emergerán de la columna a intervalos discretos y pasarán a través de algún sistema de detección adecuado, o bien serán dirigidos hacia un dispositivo de recogida de muestras. El esquema general de un cromatógrafo de gases se muestra en la figura 1.

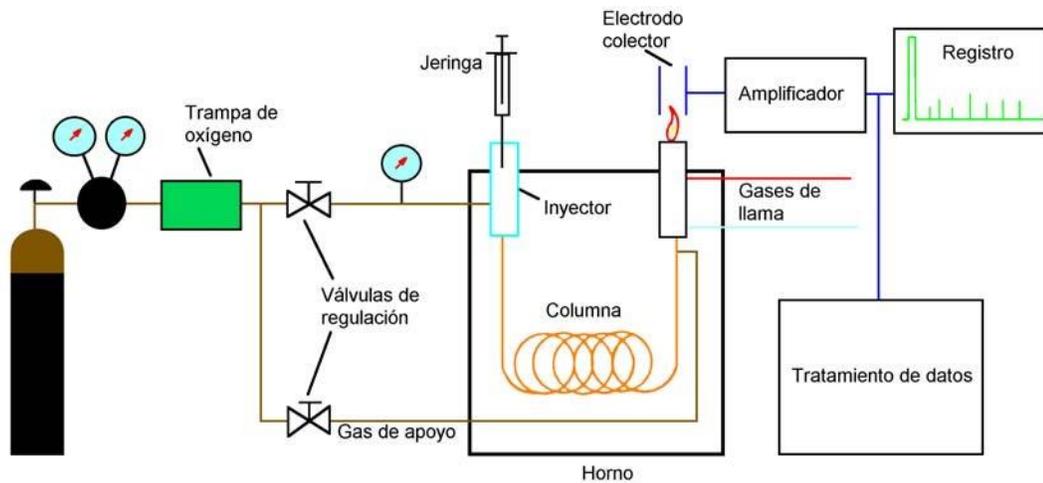


Figura 1. Esquema de un cromatógrafo de gases.

Fuente: <https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio>.

Los componentes fundamentales de un cromatógrafo de gases, son: fuente de gas, sistema de inyección, horno y columna cromatográfica, sistema de detección, sistema de registro.

3.3 KIT SOLAR FOTOVOLTAICO INTEGRADO EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DE POTENCIA

Los kits fotovoltaicos son soluciones sencillas, completas y modulares para proveer energía independiente en localizaciones remotas donde la electricidad no está disponible, es cara o con poca fiabilidad. Todos los sistemas están profesionalmente diseñados para cumplir los requerimientos estándar como luz, refrigeración, bombas de agua, etc. El kit solar permite obtener energía eléctrica a través de la luz del sol obtenida y transformada en una corriente continua. Sin embargo, el kit solar, mediante un inversor o convertidos de corriente, transforma la corriente continua en alterna. Esto ocurre porque los rayos del Sol contienen fotones de luz que, al chocar con las placas solares, producen una diferencia de potencial que hace que se genere esa corriente continua. La energía que sobra en el

proceso de transformación de energía eléctrica se puede almacenar en baterías o acumuladores para emplearlos cuando las condiciones de luz no sean adecuadas durante el día o en la noche.

3.4 ELEMENTOS DE UN KIT SOLAR FOTOVOLTAICO

Un kit solar tiene cuatro elementos que son totalmente necesarios e indispensable si estás pensando en abastecerte de energía solar (vea figura 2). Lo principal que compone un kit solar es el panel solar con el que conseguiremos recibir la radiación del Sol y generar la corriente continua. Para poder utilizar esta electricidad para los electrodomésticos y distintos aparatos electrónicos en el hogar, el kit se compone de un inversor de corriente. El inversor o convertidor se encarga de transformar la corriente continua que genera la placa solar en corriente alterna para que pueda ser empleada.

Para almacenar la energía que sobra puesto que, por lo general, no toda se consume, el kit trae baterías que pueden almacenar la energía para emplearla en las situaciones que más lo necesitemos. Por último, para que las baterías no excedan su carga y se sobrecarguen, es necesario que el kit tenga un regulador.



Figura 2. Elemento de un kit solar fotovoltaico. Fuente: Greendok

3.5 REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

En los sistemas de refrigeración, la energía es extraída de la región fría y luego es expulsada a otra región, generalmente el ambiente, que se encuentra a una temperatura mayor. Para poder realizar la expulsión de calor la temperatura del fluido debe llevarse a un valor mayor que la temperatura del ambiente.

El termino absorción se refiere al proceso químico que se lleva a cabo cuando entran en contacto algunos sólidos y gases o líquidos y gases, actuando uno como refrigerante y el otro como sistema de transporte. En algunos casos la mezcla entre las dos sustancias provoca la liberación de calor, como es el caso de la mezcla Amoniac-Agua.

Éste es un ciclo de refrigeración viable cuando se tienen fuentes de calor a bajo costo, tales como la energía geotérmica, la radiación solar, biogás o calor residual de procesos industriales (Adolfo 2011). En un refrigerador por absorción se reemplaza el compresor de vapor por un conjunto de componentes más complejos, que constan de un rectificador, un generador, un regenerador y un absorbedor (Cengel y Boles 7 edición), como se nota en la figura 3.

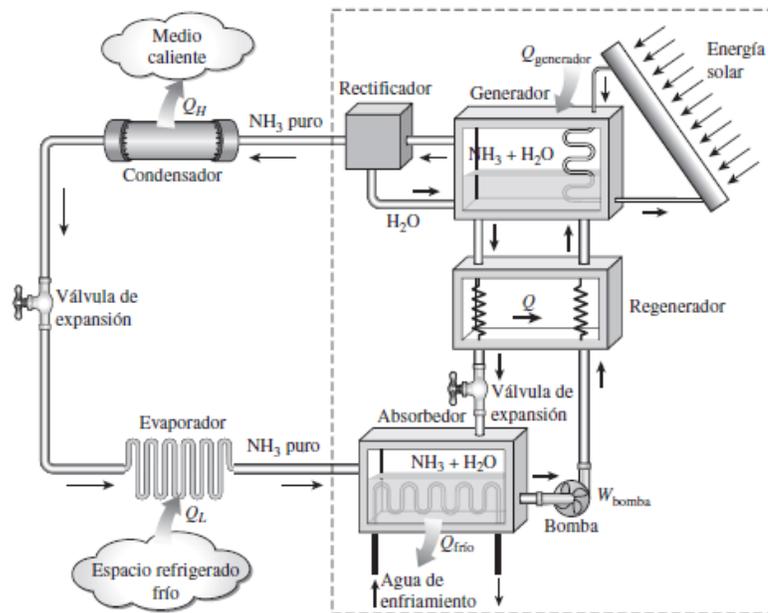


Figura 3. Ciclo de refrigeración por absorción amoníaco-agua. Fuente: Cengel y Boles 7 edición.

El proceso comienza con la mezcla de trabajo (amoníaco- agua) ubicada en el generador, este dispositivo recibe el calor provocando la evaporación del refrigerante el cual viaja hacia el rectificador, en este punto se reduce la presencia de vapores del líquido y la mezcla fuerte de amoníaco continua el recorrido hacia el condensador. En el condensador se extrae calor del refrigerante hasta que cambia de estado hacia su fase líquida, de aquí continua a través del sistema gracias a la presión concebida en el generador; el refrigerante líquido pasa ahora a través de la válvula de estrangulamiento donde disminuye su presión y temperatura saliendo como en forma de rocío. La sustancia sigue viajando por la tubería hasta entrar al evaporador, en este subsistema se toma calor del medio que se desea refrigerar y se le otorga al refrigerante provocando su evaporación; A partir de aquí el refrigerante viajara en forma gaseosa hasta llegar al absorbedor donde se mezcla

nuevamente con el líquido de transporte; generalmente es aquí donde se da un intercambio de calor con el ambiente para enfriar la mezcla antes de ser bombeada de nuevo hacia el generador. Cabe anotar que la solución de trabajo viaja del generador hacia el absorbedor cuando su concentración es débil, a través de una válvula y luego regresa a través de la bomba cuando su concentración es alta. Como vemos se cumple un ciclo tanto para el refrigerante como para el líquido de transporte.

3.6 COEFICIENTE DE RENDIMIENTO (COP)

El coeficiente de rendimiento (COP) de un sistema de refrigeración es la relación entre su capacidad para remover el calor de un lugar que se desea mantener frío y la energía suministrada para el funcionamiento del equipo. Es común la utilización de este parámetro para la comparación entre sistemas similares que operen con el mismo ciclo y la misma tecnología. Para el caso de refrigeradores solares, el calor eliminado del recinto frío (Q_e) se logra a través del efecto producido por el evaporador. En cuanto a la energía suministrada al sistema se considera toda la energía solar recibida por la superficie del colector solar o el biogas proveniente del biodigestor (Q_s), como se nota en la ecuación 1.

$$COP = \frac{Q_e}{Q_s} \quad Ec. (1)$$

3.6.1 Variables que influyen en el COP

Darwish et al. (2008) encontraron que la variación en las concentraciones de amoniaco tanto en la solución débil como fuerte, influye en los valores del COP. Hernández et al.2012 mostraron que el COP es modificado por los cambios en la concentración de

amoníaco en la solución débil, la temperatura de generación, la presión de generación y la radiación solar, siendo la presión de generación el parámetro más importante para la variación del COP. Según (Srikhirin et al., 2001; White and O'Neill, 1995) el absorbedor es uno de los componentes más críticos de cualquier sistema de refrigeración por absorción. De lo anterior se tiene que las variables más influyentes son:

Temperatura de generación: como su nombre lo indica, es aquella que se alcanza en el colector durante la generación, es decir, durante el tiempo de operación.

Presión de generación: es la presión alcanza en el colector durante la operación.

Cantidad de solución (*kg soluto + kg solvente*): es la cantidad de mezcla amoníaco-agua en kilogramos contenida en el colector.

Concentración de amoníaco $\left(\frac{g \text{ soluto}}{g \text{ disolución}}\right)$: es la relación o proporción de amoníaco y agua.

Temperatura de absorción (°C): es la alcanzada en el colector durante el proceso de absorción, es decir, durante la operación.

Presión de absorción (P): es la presión alcanzada en el absorbedor durante el tiempo de operación.

3.7 REFRIGERANTE DEL SISTEMA

En el sistema de refrigeración por absorción es necesario utilizar una mezcla binaria: refrigerante y absorbedor como fluido que circula por una parte del ciclo en vez de un refrigerante único como en el ciclo por compresión. La mezcla puede ser Amoniac – Agua o Agua – Bromuro de Litio. Para este caso en particular se utilizará una mezcla de Amoniac – Agua, en donde el refrigerante es el amoniac y el absorbedor es el agua. Los fluidos binarios como el agua – amoniac tienen una característica importante la cual los hace adecuados para este tipo de aplicaciones.

Cuando dos fases están presentes en equilibrio la composición de un componente dado no es el mismo en las dos fases. La fase vapor tendrá más contenido del componente con temperatura evaporación más baja. El amoniac tiene una tendencia a evaporarse mucho mayor que el agua a una temperatura dada, por esta razón el vapor de la disolución agua – amoniac contiene mucho más amoniac que la fase líquida en equilibrio con ella.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para encontrar las condiciones óptimas de funcionamiento del ciclo de un sistema de refrigeración por absorción híbrido que emplea energía solar y biogás es necesario el cumplimiento de las siguientes actividades:

4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se agrupó toda la documentación pertinente con el proyecto, esto implica, artículos de investigaciones de sistemas de refrigeración por absorción implementando energía solar, simulaciones, análisis de dimensionamiento, caracterización del biogás, con el fin de encontrar datos experimentales como punto de partida para corroborar los resultados de este trabajo como el COP y otras variables de mayor influencia en el proceso de refrigeración.

4.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS A MEDIR

Después de hacer una revisión bibliográfica se especificaron los parámetros que se requieren para medir el desempeño energético de tal forma que no afectaran en gran magnitud el rendimiento del sistema, con base en estas variables fue posible evaluar el calor cedido (kJ) y suministrado (kJ). Básicamente se tomaron como referencia los puntos críticos del sistema de refrigeración por absorción, como lo son: la temperatura ambiente ($^{\circ}C$), temperatura del generador ($^{\circ}C$) y la temperatura del espacio refrigerado ($^{\circ}C$).

4.3 PROCESO DE MEDICIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN EL EQUIPO

En el sistema de refrigeración por absorción se midió la temperatura en 5 puntos esenciales utilizando 5 termopares tipo k para tuberías y 1 termopar en un 1 litro de agua dentro del refrigerador como se muestra en la figura 4 y 5:



Figura 4. Nevera con sistema de refrigeración por absorción. Fuente: Propia



1. Generador
2. Condensador
3. Evaporador
4. Absorbedor
5. Quemador
6. Alimentación

Figura 5. Partes del sistema de refrigeración por absorción. Fuente: Propia



Figura 6. Puntos propuestos para la medición de temperaturas. Fuente: Propia

Model	XC-60
Rated Voltage	AC110V / DC12V
Input power	AC 90W / DC 90W
Rated Frequency	60Hz
Gas type	Propane
Total Nominal Gas Consumption	25g/h
Injector Orifice Size	∅0.28mm
Refrigerant	R717
Serial	1311808090007
<i>Made in China</i>	

Figura 7. Ficha técnica de la nevera. Fuente: Propia

Para la realización el análisis termodinámico del ciclo de refrigeración por absorción (Agua - Amoniaco) se requirieron los siguientes datos: Temperatura a la salida del Condensador, Temperatura del evaporador, Temperatura a la salida del Generador, Temperatura a la salida del Absorbedor, Temperatura en la nevera y el congelador

4.4 CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS POR MEDIO DE LA CROMATOGRAFÍA DE GASES

Debido al estado gaseoso que presentaba el metano, se realizó un análisis del biogás generado en los biodigestores por medio de la cromatografía de gases. El cromatógrafo de gases disponible se encuentra en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) sede Montería, que fue el lugar previsto para la realización de pruebas. Por otra parte, este análisis fue necesario para poder calcular la relación aire combustible y poder calorífico de la liberación del calor de esta combustión y evitar un exceso o deficiencia de aire lo cual puede retardar el proceso en el quemador durante el calentamiento de la mezcla de agua-amoniaco a la hora de separarlos en el sistema de refrigeración.



Figura 8. Biodigestores con biogás. Fuente: Propia



Figura 9. Gráfico del sistema de biodigestores. Fuente: Propia



Figura 10. Cromatógrafo UPB sede Montería. Fuente: Propia



Figura 11. Realización de la cromatografía con el biogas. Fuente: Propia

4.5 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN NECESARIA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

Para obtener la irradiación solar incidente, se utilizaron datos de monitoreo que fueron recolectados en la Universidad Pontificia Bolivariana sede Montería, con estos datos se estimó un valor de irradiación mínimo el cual proporcioné la potencia requerida para la operación del sistema. Esto se puede realizar con la ecuación mostrada a continuación:

$$Potencia = \eta_{pf} * Area_{pf} * I_{rrad} \quad Ec.2$$

$P_{otencia} = Potencia\ requerida\ por\ el\ equipo\ (Dato\ ficha\ tecnica)$

$\eta_{pf} = eficiencia\ del\ panel\ solar\ fotovoltaico$

$Area_{pf} = \text{Area del panel solar fotovoltaico}$

$I_{rrad} = \text{Irradiación solar}$

4.6 CÁLCULO DE LAS HORAS SOLARES PICO

Con los datos de radiación solar tomados de la UPB sede Montería, se seleccionó un día del mes en el cual se realizó la prueba con el fin de tener los datos de irradiación en un tiempo específico esto para poder graficar estas variables y así trazar una asíntota horizontal que divida la gráfica en dos porciones, las radiaciones mayores a la irradiación mencionada en la sección anterior (irradiación mínima requerida para proporcionar la potencia necesaria del equipo) y las menores a esta misma, luego se trazaran dos asíntotas verticales las cuales serán perpendiculares a la asíntota horizontal cuyos puntos de corte serán específicamente las hora del día en la que el panel igualará y superará la irradiación requerida que entregara la potencia de operación del equipo y la hora en la que disminuye hasta la irradiación requerida; este intervalo determino el tiempo de operación del equipo de forma óptima y también, mostro el tiempo de prueba del equipo que estará en función del tiempo que demoré el panel fotovoltaico en alcanzar la irradiación requerida más el tiempo de operación optima del equipo.

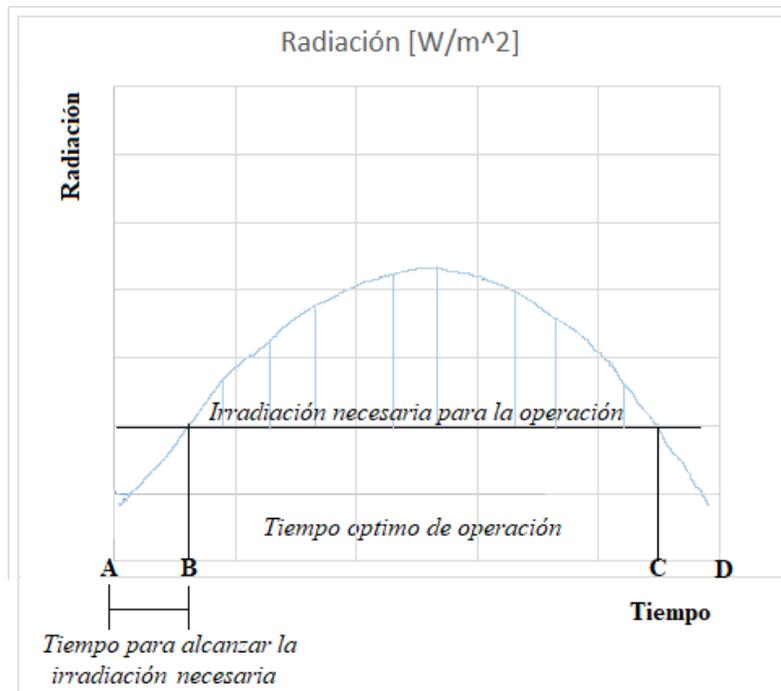


Figura 12. Gráfico propuesto para el cálculo de las HSP. Fuente: Propia

tecni green®		Energía & Potencia®	
Technical Data			
MODULE TYPE	USP-5M-200P-36		
Peak Power (Pmax)	200 (W)		
Production tolerance	+3 (%)		
Max Power Current (Imp)	11.14 (A)		
Max Power Voltage (Vmp)	17.95 (V)		
Short Circuit Current (Isc)	12.05 (A)		
Open Circuit Voltage (Voc)	22.02 (V)		
Weight	15 (Kg)		
Dimensions	1320*992*35 (mm)		
Maximum System Voltage	1000 (Voc)		
Wind Resistance	2400 (Pa)		
All technical data at standart test condition Am=1.5 E=1000W/m2 Tc= 25°C 25 Years Limited Output Guarantee			
WARNING ELECTRIC HAZARD THIS UNITS PRODUCE ELECTRICITY WHEN EXPOSED TO LIGHT COVER GLASS BEFORE REMOVING TERMINAL FUNCTION BOX LID.			
CE		ISO	

Figura 13. Ficha técnica del kit solar fotovoltaico. Fuente: Propia



Figura 14. Gráfico del generador fotovoltaico. Fuente: Propia



Figura 15. Batería acoplada al panel. Fuente: Propia

4.7 REALIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS PRUEBAS

Luego de finalizada la etapa previa a la experimentación, se hicieron cuatro (2) pruebas en un lapso de una semana las cuales 2 de ellas fueron enfocadas en los tipos de biogás, debido a que se contaban con dos biodigestores y cada uno tenía una mezcla diferente de biomásas, por ende, el porcentaje en volumen de metano era distinto en cada prueba. El

biogas utilizado tiene una combinación de 30% heces de vaca y 70% contenido ruminal y la otra muestra es 100% heces de vaca. Una vez realizadas dichas pruebas se precedieron a graficar las temperaturas obtenidas con el fin de obtener curvas de enfriamiento.



Figura 16. Pruebas con la nevera. Fuente: Propia



Figura 17. Generación de flama en el quemador. Fuente: Propia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

Los resultados de la cromatografía se muestran en las siguientes imágenes. En ellas se muestran los componentes generales del biogás expresados en porcentaje de volumen.

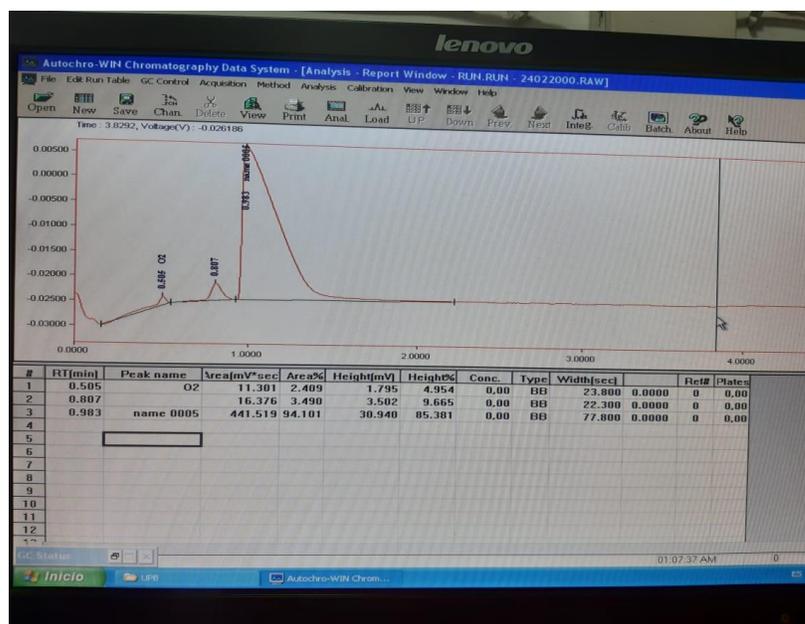


Figura 18. Cromatografía Gas patrón. Fuente: Propia

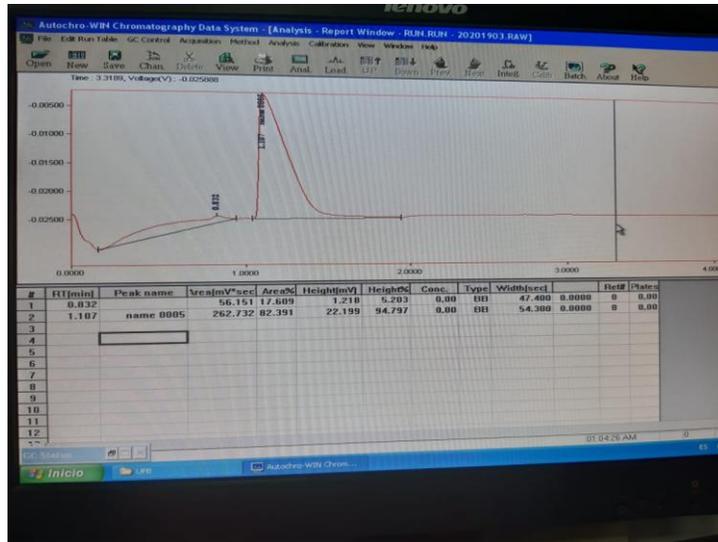


Figura 19. Cromatografía biogás. Fuente: Propia

Tabla 2. Resultados de la cromatografía.

Cromatografía	Área CH4 (mV*sec)	% CH4
H70-CR30	262,732	58,378
H100	237,847	52,849
PATRÓN	441,519	98,104

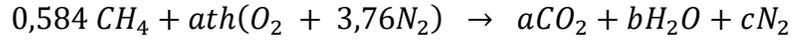
Tabla 3. Composición H70-CR30

componente	formula	%
metano	CH4	58,378
Bióxido de carbono por diferencia	C02	41,622

Porcentaje de volumen de metano: con los datos obtenidos de la cromatografía se realizaron los siguientes cálculos:

$$\% CH_4 = \frac{\text{Área de metano}}{\text{Área del gas patrón}} \times \% \text{Gas patrón}$$

$$\% CH_4 = \frac{262,732}{441,519} \times 0,983 = 0,584 = 58,400$$



Balance: ath : Coeficiente estequimétrico del aire

$$C: 0,584 = a$$

$$N_2: 3,76ath = c$$

$$H: 4 \times 0,584 = 2b \rightarrow b = 1,168$$

$$O_2: 2ath = 2a + b \rightarrow ath = 1,168$$

Masa de aire:

Masa en kg de aire = kmol de aire × Peso molecular del aire

$$Masa \text{ en kg de aire} = 1,168 \text{ kmol} \times \frac{177,280 \text{ kg aire}}{1 \text{ kmol}}$$

$$Masa \text{ en kg de aire} = 207,060 \text{ kg}$$

Masa de metano:

Masa en kg de CH₄ = kmol de aire × Peso molecular del CH₄

$$Masa \text{ en kg de CH}_4 = 0,584 \text{ kmol} \times \frac{16 \text{ kg aire}}{1 \text{ kmol}}$$

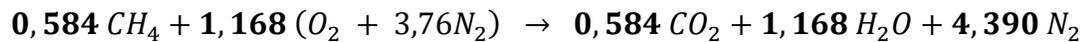
$$Masa \text{ en kg de CH}_4 = 9,344 \text{ kg}$$

Relación aire/combustible:

$$R_{aire/combustible} = \frac{207,060 \text{ kg de aire}}{9,344 \text{ kg de CH}_4}$$

$$R_{aire/combustible} = 22,150 \frac{\text{kg de aire}}{\text{kg de CH}_4}$$

Ecuación balanceada:



Calor liberado en la reacción:

$$\Delta H^0_F = \sum N_{\text{productos}} * \Delta H^0_{F_{\text{productos}}} - \sum N_{\text{reactivos}} * \Delta H^0_{F_{\text{reactivos}}}$$

Donde:

ΔH^0_F = entalpia de formación de las sustancias

N = coeficiente estequimétrico

$$\begin{aligned} \sum N_{\text{productos}} * \Delta H^0_{F_{\text{productos}}} \\ = 0,584 * (\Delta H^0_{F_{CO_2}}) + 1,168 * (\Delta H^0_{F_{H_2O}}) + 4,390 * (\Delta H^0_{F_{N_2}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum N_{\text{productos}} * \Delta H^0_{F_{\text{productos}}} \\ = [0,584 * (-393,520) + 1,168(-241,800) + 0,584 * (0)] \frac{kJ}{mol} \\ \sum N_{\text{productos}} * \Delta H^0_{F_{\text{productos}}} = -512,230 \frac{kJ}{mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum N_{\text{reactivos}} * \Delta H^0_{F_{\text{reactivos}}} \\ = 0,584 * (\Delta H^0_{F_{CH_4}}) + 1,168 * (\Delta H^0_{F_{O_2}}) + 4,391 * (\Delta H^0_{F_{N_2}}) \\ \sum N_{\text{reactivos}} * \Delta H^0_{F_{\text{reactivos}}} = [0,584 * (-75) + 1,168 * (0) + 4,391 * (0)] \frac{kJ}{mol} \end{aligned}$$

$$\sum N_{\text{reactivos}} * \Delta H^0_{F_{\text{reactivos}}} = -43,800 \frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta H^0_F = \sum N_{\text{productos}} * \Delta H^0_{F_{\text{productos}}} - \sum N_{\text{reactivos}} * \Delta H^0_{F_{\text{reactivos}}}$$

$$\Delta H^0_F = -512,230 \frac{kJ}{mol} + (-43,800 \frac{kJ}{mol})$$

$$\Delta H^0_F = -468,430 \frac{kJ}{mol}$$

Procederemos a calcular el poder calorífico volumétrico con base a las magnitudes con las que contamos:

$$P * V = n * R * T$$

P= presión absoluta = presión manométrica + presión atmosférica

V= Volumen del biogás

n=moles

R= Constante de los gases

T= Temperatura absoluta del biogás

$$5,08 \text{ atm} * 14,34 \text{ L} = n * 82,05 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{Kmol} * \text{K}} * 297\text{K}$$

$$n = \frac{5,08 \text{ atm} * 14,34 \text{ L}}{82,05 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{kmol} * \text{K}} * 297\text{K}}$$

$$n = 2,98 \text{ mol}$$

$$\text{Poder calorifico volumetrico} = n * \Delta H^0_F = 2,98 \text{ mol} * 468,43 \frac{kJ}{mol}$$

$$\text{Poder calorifico volumetrico} = 1400,30 \text{ kJ}$$

Ahora se procedió a calcular la cantidad de calor que necesita la mezcla agua-amoniaco para poder llegar a la temperatura de ebullición, y así separar la mezcla para que continúe el ciclo de refrigeración.

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Donde:

Q= Calor recibido

m= Masa de la sustancia

$C_p = \text{Calor específico}$

$\Delta T = \text{Diferencial de temperatura}$

Como sabemos la masa de la mezcla en general vamos a despejar la m de cada una de las ecuaciones.

Para agua:

$$m_1 = \frac{Q}{C_{p1} * \Delta T}$$

Para el amoniaco:

$$m_2 = \frac{Q}{C_{p2} * \Delta T}$$

La mezcla tiene una masa de 0,315kg, es decir $m_1 + m_2 = 0,315kg$.

$$\frac{Q}{C_{p1} * \Delta T} + \frac{Q}{C_{p2} * \Delta T} = m_1 + m_2 = 0,315Kg$$

$$Q * \left[\frac{1}{4,186 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * (180 - 110)^\circ C} + \frac{1}{4,7 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * (180 - 110)^\circ C} \right] = 0,315kg$$

$$Q * 6,450 * 10^{-3} \frac{kg}{kJ} = 0,315kg$$

$$Q = \frac{0,315 * 10^3}{6,450} kJ$$

$$Q = 48,830 kJ$$

Este último valor sería el calor que se necesita suministrar a la mezcla para su posterior separación, y si podemos apreciar:

Poder calorifico volumetrico > Q de separación de la mezcla

$$1400,30 kJ > 48,830 kJ$$

Por ende, el volumen del gas sumado a su poder calorífico, sí satisface las necesidades como combustible en el quemador a la hora de transferir calor al generador y posteriormente a la mezcla.

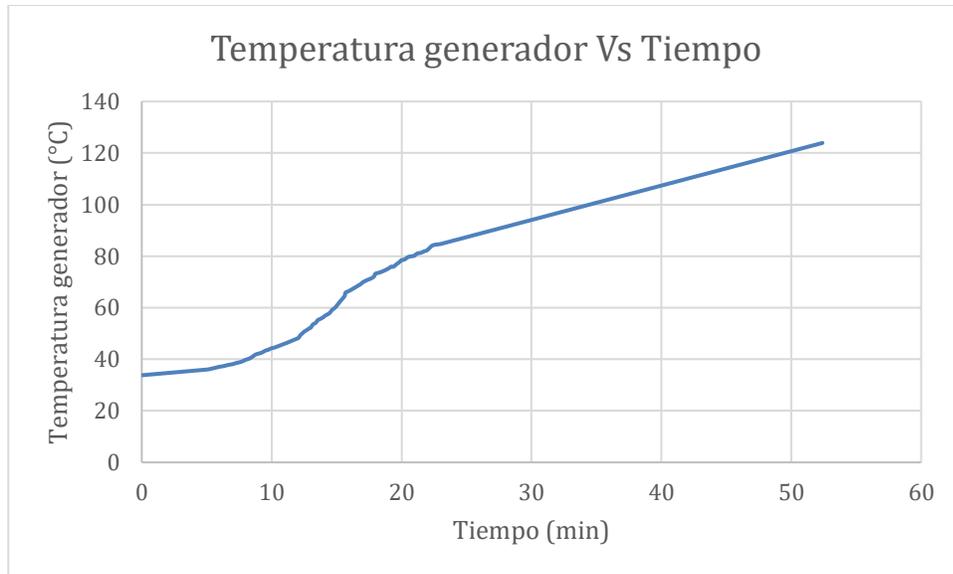


Figura 20. Curva de calentamiento del generador.

5.2 HORAS PICO SOLAR PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA NEVERA CON EL KIT SOLAR FOTOVOLTAICO

Obtención de las coordenadas del lugar por medio de Google Maps:

Montería (Universidad de Córdoba)

LATITUD: 8°47'31,2"N

LONGITUD: 75°51'33,9"W

ACIMUT = 206°

INCLINACIÓN REAL DE LA SUPERFICIE = 10°

Declinación solar:

$$\delta = -23,45^\circ \times \cos \left[\frac{360}{365} \times (d + 10) \right]$$

Donde:

δ = Declinación solar

d = Día del año

Tabla 4. Declinación solar entre los años 2015 y 2016.

Mes	Día	Declinación solar (Grados)
jun-15	152	22,00494
jul-15	182	23,13712
ago-15	213	17,97814
sep-15	244	7,81984
oct-15	274	-4,11621
nov-15	305	-15,28703
dic-15	335	-22,07389
ene-16	1	-23,03084
feb-16	32	-17,58342
mar-16	61	-8,00983
abr-16	92	4,31476
may-16	122	15,13341
jun-16	153	22,14119

5.3 OBTENCIÓN DE LA INCLINACIÓN ÓPTIMA

El ángulo de inclinación variará desde $\beta = \varphi - \delta$ en el solsticio de verano a $\beta = \varphi + \delta$ en el solsticio de invierno.

Donde:

$\beta =$ *Inclinación Optima*

$\varphi =$ *Latitud*

$\delta =$ *Declinación*

Tabla 5. Inclinación óptima entre los años 2015 y 2016.

Mes	Latitud (Grados)	Declinación solar (Grados)	Inclinación óptima (Grados)
jun-15	8.79	22,00494	-13,21494
jul-15	8.79	23,13712	-14,34712
ago-15	8.79	17,97814	-9,18814
sep-15	8.79	7,81984	0,97015
oct-15	8.79	-4,11621	12,90621
nov-15	8.79	-15,28703	24,07703
dic-15	8.79	-22,07389	30,86389
ene-16	8.79	-23,03084	31,82084
feb-16	8.79	-17,58342	26,37342
mar-16	8.79	-8,00983	16,79983
abr-16	8.79	4,31476	4,47523
may-16	8.79	15,13341	-6,34341
jun-16	8.79	22,14119	-13,35119

5.4 RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL

Para la obtención de los datos de radiación global horizontal. Se utilizaron las coordenadas geográficas del punto en cuestión, y se buscaron en una de las muchas bases de datos que existen. En nuestro caso, se utilizó la base de datos de la Atlas Interactivo - Radiación IDEAM.

Tabla 6. Radiación global horizontal.

Mes	Radiación global horizontal (kWh/m ² *día)
jun-15	5,131
jul-15	4,168
ago-15	4,504
sep-15	4,034
oct-15	3,927
nov-15	3,359
dic-15	4,554
ene-16	5,067
feb-16	4,984
mar-16	5,040
abr-16	4,799
may-16	3,944
jun-16	4,584

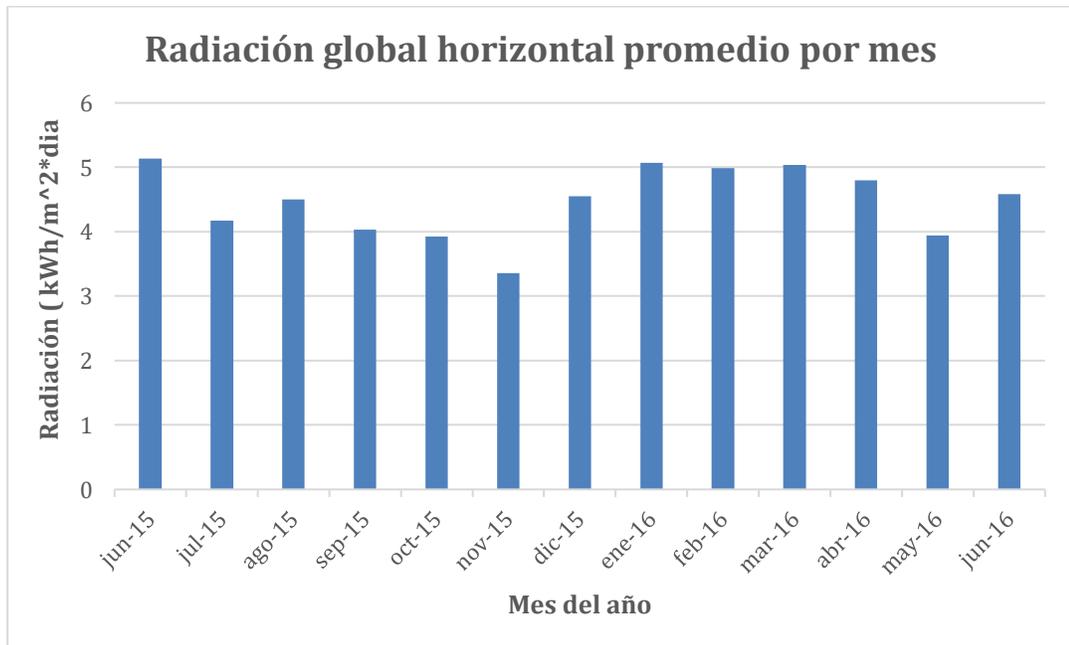


Figura 21. Radiación horizontal promedio entre los años 2015 y 2016.

5.5 OBTENCIÓN DEL FACTOR DE IRRADIANCIA (FI)

Este factor va a corregir los valores de radiación obtenidos para una desorientación de 10° hacia el este.

Utilizamos las siguientes fórmulas:

$$FI = 1 - (1,2 * 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2 + 3,5 * 10^{-5} * \alpha^2) \quad \text{PARA } 15^\circ < \beta < 90^\circ$$
$$FI = 1 - (1,2 * 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2) \quad \text{PARA } \beta < 15^\circ$$

Donde:

FI: factor de irradiación (sin unidades)

β : inclinación real de la superficie (°)

β_{opt} : inclinación óptima de la superficie (°)

α : acimut de la superficie (°)

Tabla 7. Factor de irradiación entre los años 2015 y 2016.

Mes	Factor de irradiación
jun-15	0,99721
jul-15	0,99707
ago-15	0,99769
sep-15	0,99891
oct-15	1,00034
nov-15	1,00168
dic-15	1,00250
ene-16	1,00261
feb-16	1,00196
mar-16	1,00081
abr-16	0,99933
may-16	0,99803
jun-16	0,99719

5.6 OBTENCIÓN DE LAS HORAS SOL PICO DIA (HSP)

Multiplicando el factor de Irradiancia (FI) por la radiación global diaria para ángulo óptimo, obtendremos los siguientes valores:

Tabla 8. Horas solar pico por día entre los años 2015 a 2016.

Mes	Tiempo de exposición (horas)
jun-15	5,11668
jul-15	4,15578
ago-15	4,49359
sep-15	4,02960
oct-15	3,92833
nov-15	3,36464
dic-15	4,56538
ene-16	5,08022
feb-16	4,99376
mar-16	5,04408
abr-16	4,79578
may-16	3,93623
jun-16	4,57111

5.7 CÁLCULO DE LA RADIACIÓN NECESARIA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.

Para este caso se utilizó la ecuación 2:

$$P_{otencia} = \eta_{pf} * Area_{pf} * I_{rrad} \quad Ec. 2$$

$$P_{otencia} = Potencia\ requerida\ por\ el\ equipo\ (Dato\ ficha\ tecnica)$$

$$P_{otencia} = 200\ W$$

$$\eta_{pf} = eficiencia\ del\ panel\ solar\ fotovoltaico$$

$$\eta_{pf} = 0,25$$

$Area_{pf}$ = Area del panel solar fotovoltaico

$$Area_{pf} = 1,320 \text{ m} \times 0,992 \text{ m} = 1,309 \text{ m}^2$$

I_{rrad} = Irradiación solar

$$I_{rrad} = \frac{Potencia}{\eta_{pf} \times Area_{pf}}$$

$$I_{rrad} = \frac{90 \text{ W}}{0,25 \times 1,309 \text{ m}^2} = 275,02 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

5.8 HORAS DE RESPALDO DE LA BATERÍA

Contamos con una sola batería de 12V y 150 Ah. Por tanto:

$$12\text{V} * 150\text{Ah} = 1800 \text{ Wh}$$

$$1800 \text{ Wh} \times 1 \text{ baterías} = 1800 \text{ Wh}$$

$$1800 \text{ Wh} / 200 \text{ W} = 9 \text{ horas.}$$

Corriente de carga para baterías:

Ahora la corriente de carga requerida para esta batería (la corriente de carga debe ser 1/10 de las baterías Ah)

$$150 \text{ Ah} \times (1/10) = 15 \text{ A}$$

Tiempo de carga requerido para la batería:

Tiempo de carga de la batería = Batería Ah / Corriente de carga

$$T = \text{Ah} / \text{A} = 150 \text{ Ah} / 15\text{A} = 1,5 \text{ horas de carga.}$$

5.9 CÁLCULO DEL TIEMPO DE OPERACIÓN OPTIMO DEL EQUIPO

Con los datos que se recolectaron en la Universidad Pontificia Bolivariana sede Montería se realizó una gráfica de radiación vs horario de exposición solar del equipo:

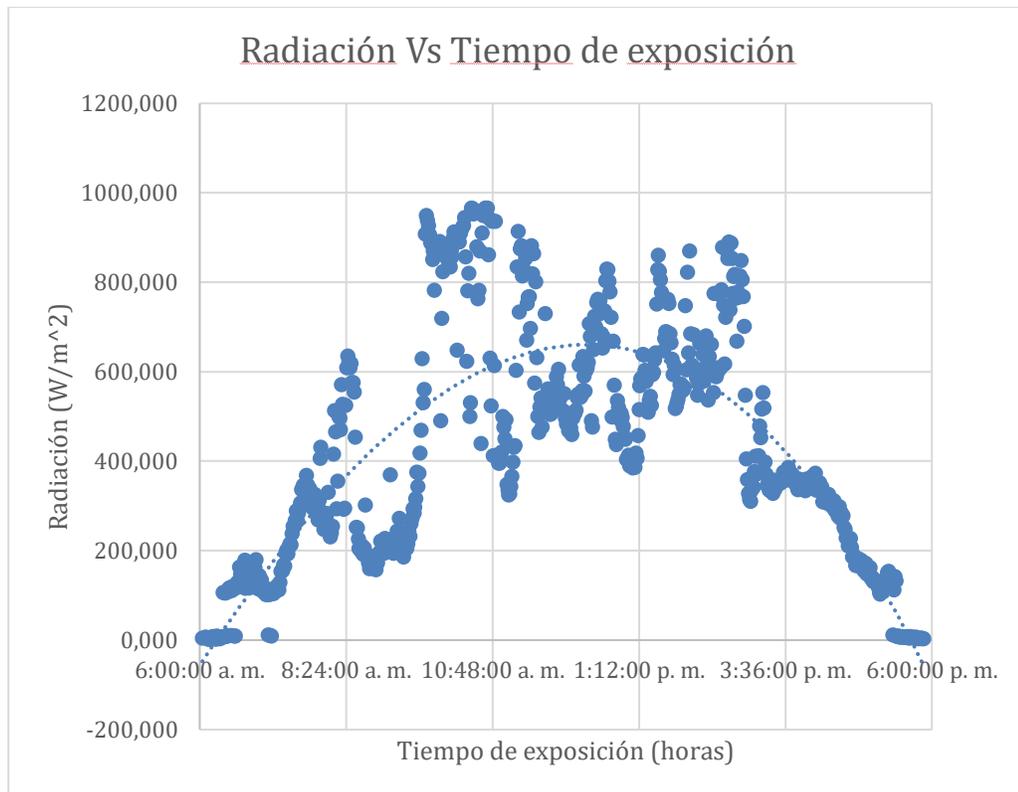


Figura 22. Radiación vs horario de exposición solar del equipo. Fuente: Propia

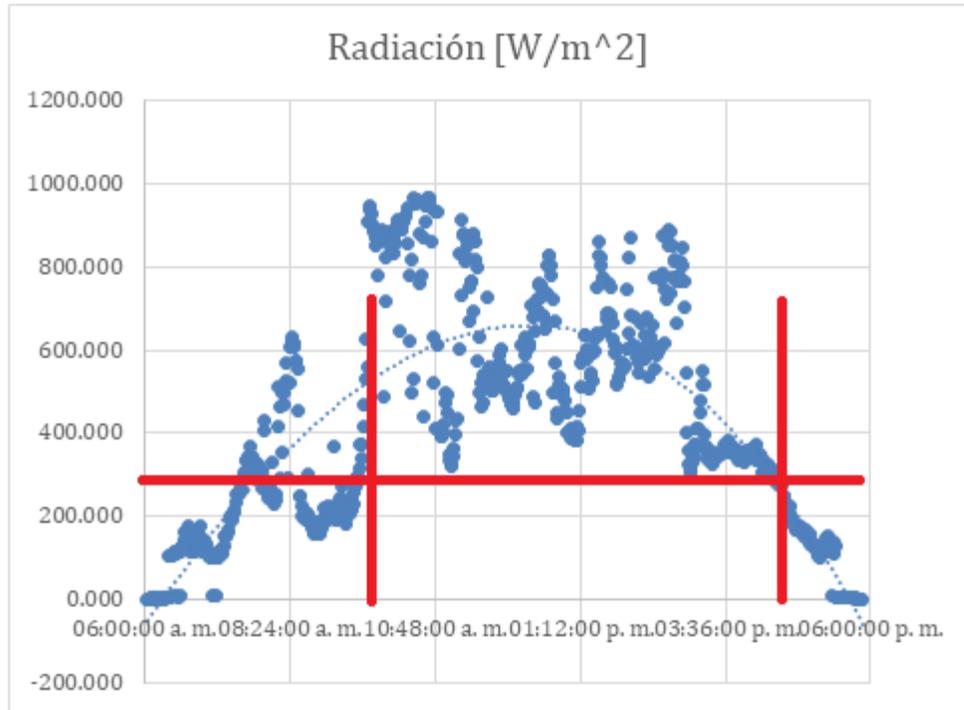


Figura 23. Grafica del tiempo óptimo de operación del equipo. Fuente: Propia

Como podemos ver en la gráfica el tiempo óptimo de operación del equipo comenzaría aproximadamente a las 9:40 am y estaría terminando más o menos a las 4:50 pm, lo cual daría un lapso de aproximadamente 7,2 horas de operación óptima del equipo, se tardaría 3 hora con 40 minutos en comenzar a operar al equipo de forma óptima, puesto que hay que adicionarle las 1,5 horas que se demora en cargar la batería mas el tiempo que se demore en llegar a la radiación necesaria.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con la literatura se pudo determinar que con una cantidad de solución de 0,315 kg y con una concentración de 0,4kg de amoniaco por cada 1kg de agua, la mezcla fue capaz de separarse dentro del generador bajo un diferencial de temperatura entre 110°C y 180°C en el generador, es decir la cantidad de masa que hay es ideal para recibir el calor de la fuente de energía y separarse para dar paso al proceso de refrigeración.

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron con las distintas pruebas del biogas se llegó a que el biogas producido en los biodigestores suministro un poder calorífico de 1400,30 kJ capaz de separar la mezcla amoniaco-agua en el ciclo que requiere 48,83 kJ, dado que el poder calorífico volumétrico supera el calor necesario para llegar al punto de ebullición de la mezcla antes de la rectificación y condensación del refrigerante.

Con base a la literatura, se pudo decir que la temperatura máxima promedio que puede alcanzar el generador es aproximadamente 140°C, durante la prueba el generador fue capaz de superar los 110°C lo cual indica que a partir de esta temperatura comienza el funcionamiento óptimo del equipo.

De acuerdo con los resultados, para garantizar que el panel solar fotovoltaico proporcione la radiación necesaria de $275,02 \frac{W}{m^2}$ para el funcionamiento del equipo se debe exponer el panel por un tiempo mayor a 3 horas y 40 minutos para el cual el equipo alcance la potencia requerida que es de 200W para empezar a funcionar de manera óptima durante un tiempo mayor a 7 horas aproximadamente.

7. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones están basadas en la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo de investigación:

- Debido a que la radiación solar varía durante todo el año, se recomienda escoger el mes más crítico según estudios previos del IDEAM de esta manera se pueden escoger datos de referencia para analizar las horas solares pico que requiere el kit solar para alcanzar la potencia requerida por el equipo.
- Al momento de usar el biogas en el equipo se recomienda un lugar tranquilo y abierto para mantener la flama generada encendida y permitir que los gases generados salgan al aire libre.
- Los tanques de biogas vienen con un manómetro que indica la presión del gas acumulado, se recomienda revisar constantemente el valor de la presión tomando en cuenta que pueden alcanzar un valor máximo de 60 PSI.
- A lo largo de la utilización del biogas con fuente de energía se recomienda que la nevera se mantenga cerrada por el mayor tiempo posible, para evitar pérdidas de carga durante el proceso de enfriamiento.
- Se recomienda diseñar un mecanismo para conectar el biogas de los tanques al quemador de la nevera de tal forma que se garantice continuidad en la generación de calor.

8. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, A., Pizarro, C. & Folgeras, M., (2012). *Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico*, Universidad de Oviedo: Asturias.

Arango, J., & González, L. (2016). *Evaluación Del Potencial Energético De La Gasificación En Lecho Fijo Para Cuatro Biomosas Residuales En El Departamento De Córdoba. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería.*

ASTM C29 / C29M-17a, Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2017

ASTM D2015. *Standard Test Method for gross Calorific Value of Solid fuel by the Adiabatic Bomb Calorimeter* ASTM internacional: Washington DC, EEUU (2000).

ASTM D7176. *Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke* ASTM internacional: West Conshohocken. EEUU (2009).

ASTM D7582. *Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis* ASTM internacional: West Conshohocken. EEUU (2012).

BESEL, S.A., (2007). *Biomasa. Gasificación, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energía (IDAE): Madrid.*

Biagini, E., Barontini, F., & Tognotti, L. (2014). Gasification of agricultural residues in a demonstrative plant: Corn cobs. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 173, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.086>

Bridgwater, A.V. (2013) *The technical and economic feasibility of biomass gasification for Power generation. Fuel.*

Buragohain, B. Pinakeswar, M. & Moholkar, V. S., (2010). *Biomass gasification for decentralized power generation. The indian perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), p. 73-92.*

Carta Gonzales, J. (2009) *Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energías renovables.* Madrid: Pearson Educación.

IEA, (2010). *Energy Technology Perspectives. Scenarios and strategies to 2050, IEA publications:* Paris, Francia.

Jeguirim, M., Bikai, J., Elmay, Y., Limousy, L., & Njeugna, E. (2014). *Thermal characterization and pyrolysis kinetics of tropical biomass feedstocks for energy recovery.* Energy for Sustainable Development, 23, 188–193.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.009>

Mendoza, J. (2014). *Planta piloto de generación de energía eléctrica Integrada utilizando residuos agrícolas para actividades de Investigación y Desarrollo (I+D) en el Departamento de Córdoba.* Montería: Universidad Pontificia Bolivariana.

Mesa, J. & Romero, L., (2009). *Análisis del potencial de la conversión termoquímica de biomasa residual agrícola en el departamento de Córdoba con miras a la obtención de biocombustibles, Tesis ingeniero mecánico:* Universidad Pontificia Bolivariana, Sede Montería.

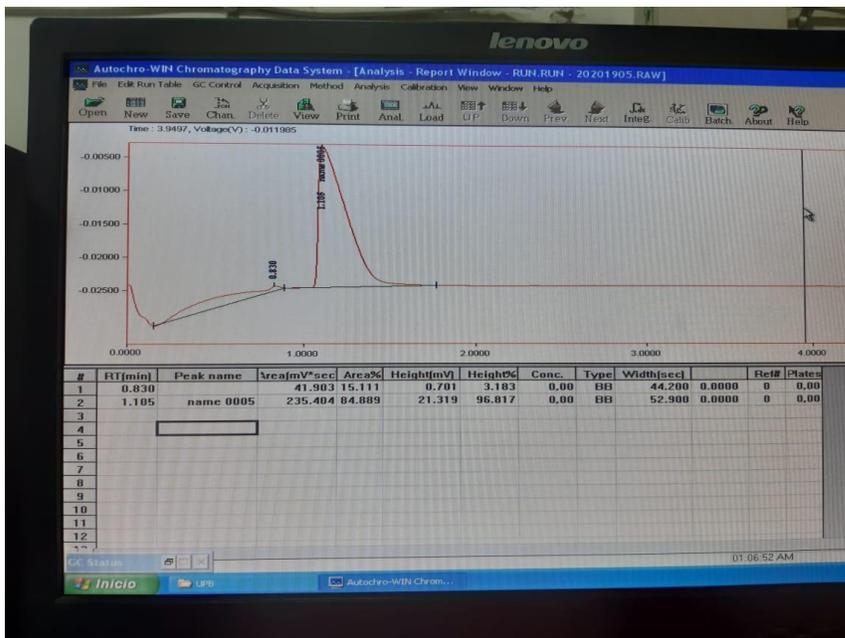
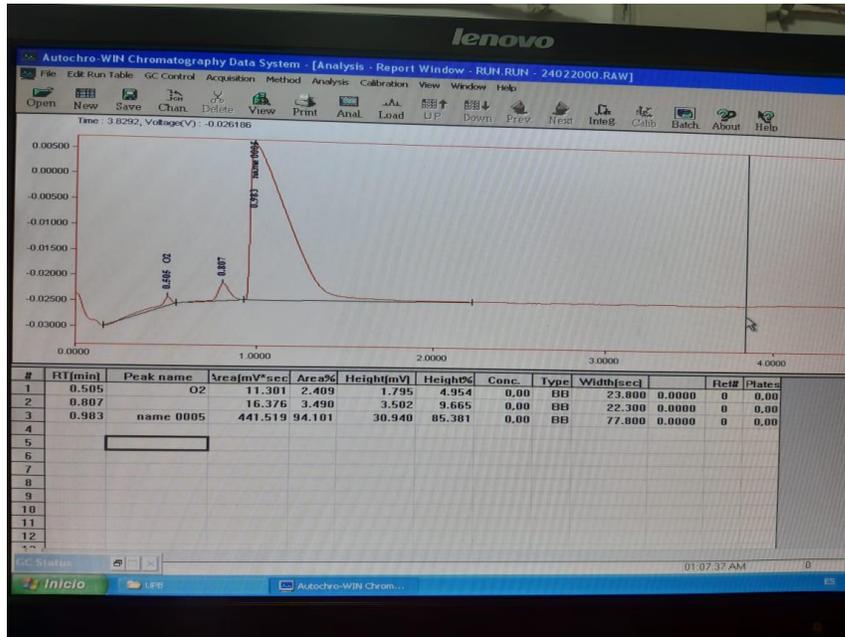
Mubashar, M., Munir, A., Ahmad, M., & Tanveer, A. (2018). Downdraft gasifier structure and process improvement for high quality and quantity producer gas production. *Journal of the Energy Institute*, 91(6), 1034–1044. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.07.005>

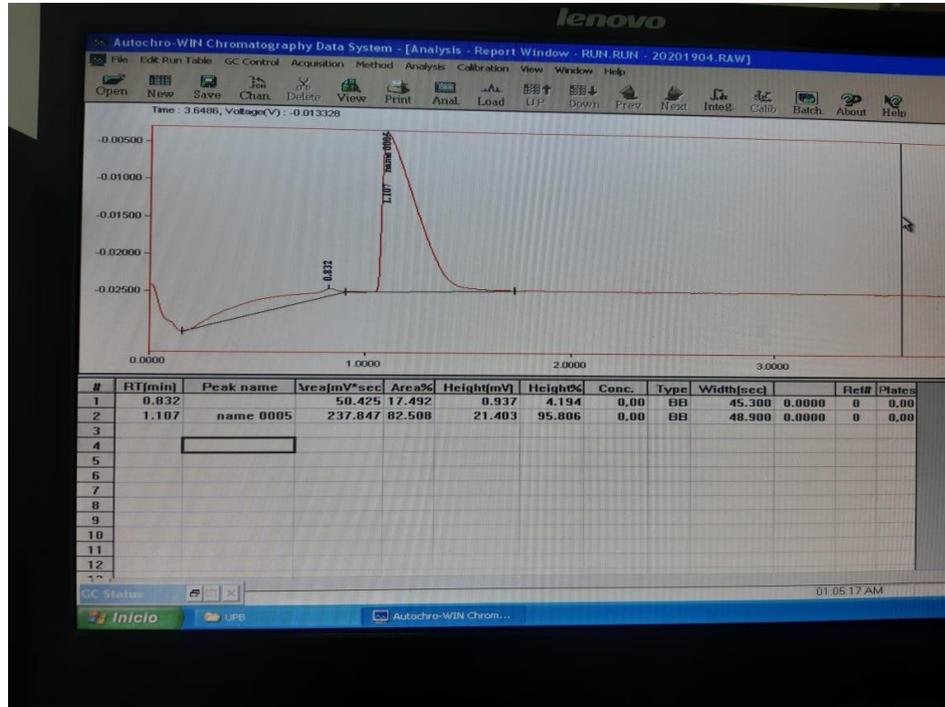
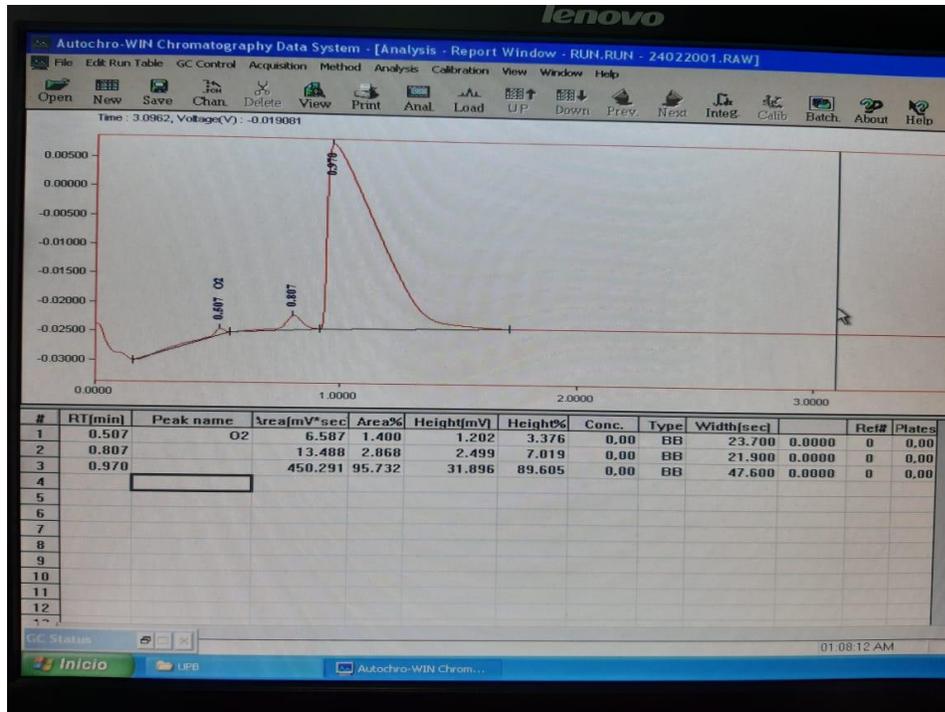
Turare (2015). *Biomass gasification technology and utilisation*. Institute university of Flensburg – Germany - <http://mitglied.lycos.de/cturare/bio.htm>.

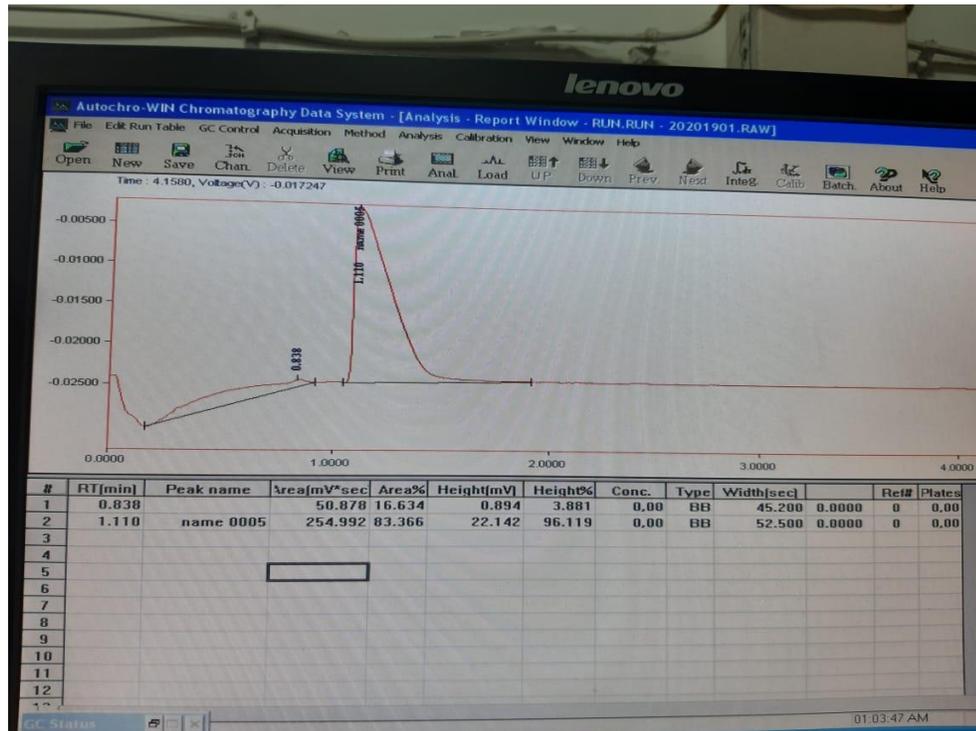
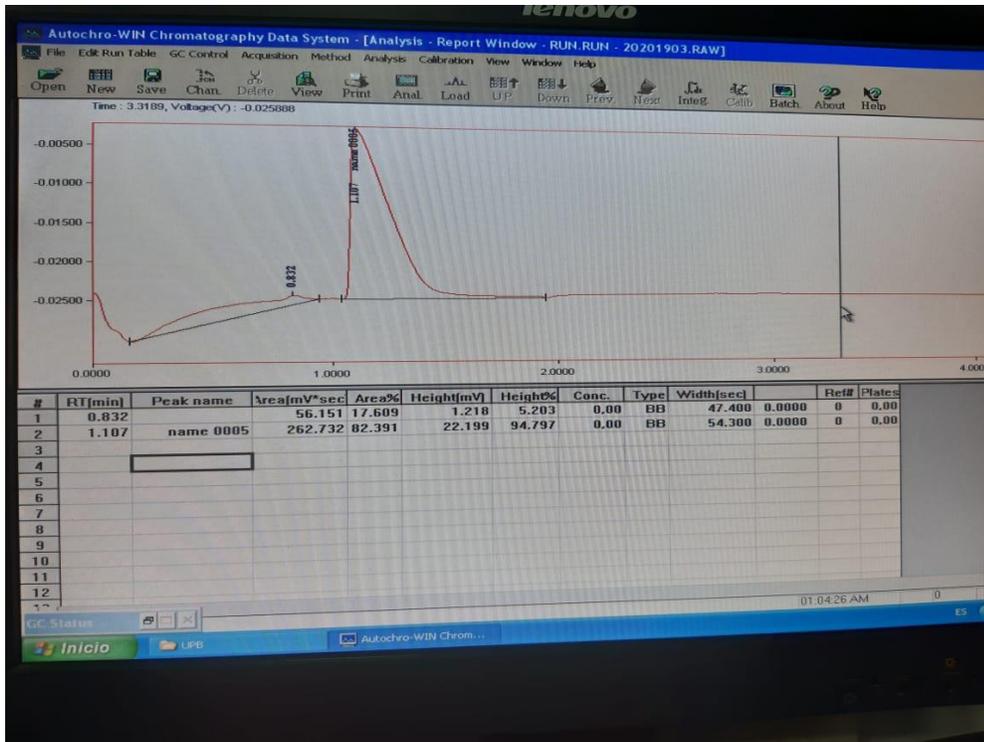
World Energy Council, (2013). *Recursos energéticos globales. Encuesta 2013. Resumen*, World Energy Council: Londres.

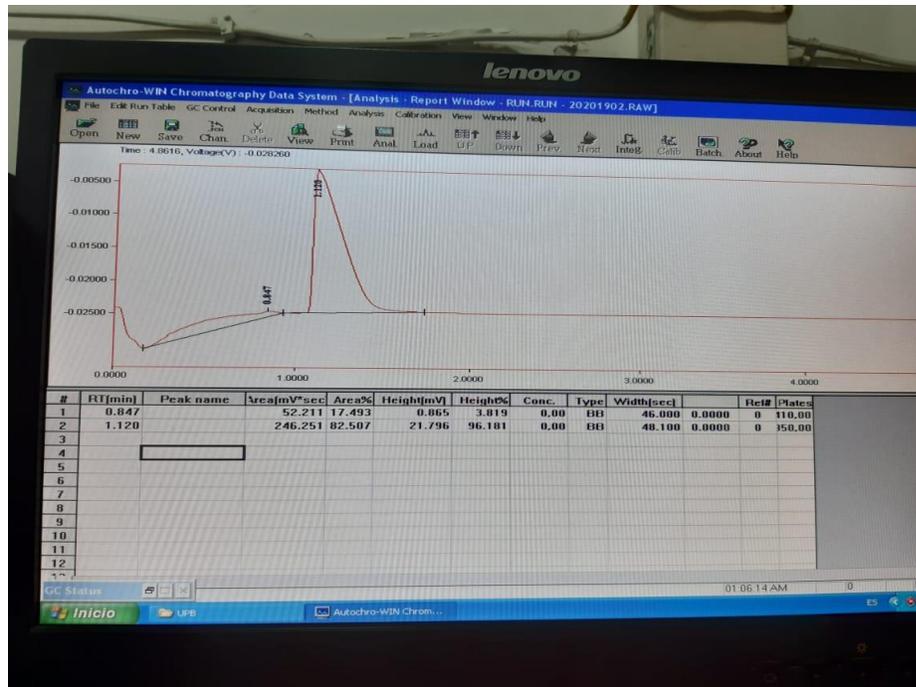
9. ANEXOS

Anexo 1. Cromatografías de las diferentes pruebas realizadas. Fuente: Propia









Anexo 2. Resultados prueba biogas H70-CR30 en la nevera.

Tiempo (min)	Temperatura en el generador (°C)
0	33,8
5	36
5,25	36,2
5,5	36,5
5,75	36,8
6	37,1
6,25	37,3
6,5	37,6
6,75	37,9
7	38,1
7,25	38,5
7,5	38,8
7,75	39,2
8	39,8
8,25	40,2
8,5	40,9
8,75	41,8
9	42,2
9,25	42,6

9,5	43,3
9,75	43,7
10	44,3
10,25	44,6
12	48,1
12,2	49,3
12,4	50,2
12,5	50,7
12,7	51,3
12,9	52
13	52,2
13,09	52,9
13,18	53,5
13,27	53,8
13,36	54
13,45	54,5
13,54	55,1
13,63	55,4
13,72	55,6
13,81	55,8
13,9	56,1
14	56,4
14,09	56,8
14,18	57,1
14,27	57,3
14,36	57,6
14,45	57,9
14,54	58,4
14,63	59
14,72	59,4
14,81	59,7
14,9	60,1
15	60,7
15,3	62,6
15,6	64,4
15,7	65,9
16	66,6
16,87	69,2
17	69,8
17,34	70,7
17,68	71,4

17,89	72,2
18	73,2
18,4	73,8
19	75,2
19,19	75,9
19,38	75,9
19,57	76,7
19,76	77,4
19,95	78,2
20	78,5
20,24	78,7
20,48	79,6
20,72	79,9
20,96	80,1
21	80,2
21,2	81
21,5	81,3
21,7	81,8
21,9	82,1
22	82,4
22,14	83,1
22,28	83,8
22,42	84,2
22,56	84,4
22,7	84,5
22,84	84,6
23	84,7
23,3	85,1
23,6	85,5
23,9	85,9
24,2	86,3
24,5	86,7
24,8	87,1
25,1	87,5
25,4	87,9
25,7	88,3
26	88,7
26,3	89,1
26,6	89,5
26,9	89,9
27,2	90,3

27,5	90,7
27,8	91,1
28,1	91,5
28,4	91,9
28,7	92,3
29	92,7
29,3	93,1
29,6	93,5
29,9	93,9
30,2	94,3
30,5	94,7
30,8	95,1
31,1	95,5
31,4	95,9
31,7	96,3
32	96,7
32,3	97,1
32,6	97,5
32,9	97,9
33,2	98,3
33,5	98,7
33,8	99,1
34,1	99,5
34,4	99,9
34,7	100,3
35	100,7
35,3	101,1
35,6	101,5
35,9	101,9
36,2	102,3
36,5	102,7
36,8	103,1
37,1	103,5
37,4	103,9
37,7	104,3
38	104,7
38,3	105,1
38,6	105,5
38,9	105,9
39,2	106,3
39,5	106,7

39,8	107,1
40,1	107,5
40,4	107,9
40,7	108,3
41	108,7
41,3	109,1
41,6	109,5
41,9	109,9
42,2	110,3
42,5	110,7
42,8	111,1
43,1	111,5
43,4	111,9
43,7	112,3
44	112,7
44,3	113,1
44,6	113,5
44,9	113,9
45,2	114,3
45,5	114,7
45,8	115,1
46,1	115,5
46,4	115,9
46,7	116,3
47	116,7
47,3	117,1
47,6	117,5
47,9	117,9
48,2	118,3
48,5	118,7
48,8	119,1
49,1	119,5
49,4	119,9
49,7	120,3
50	120,7
50,3	121,1
50,6	121,5
50,9	121,9
51,2	122,3
51,5	122,7
51,8	123,1

52,1	123,5
52,4	123,9