

**ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE
ENERGÍA A TRAVES DE CICLOS DE POTENCIA BRAYTON CON
INTERENFRIAMIENTO, RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN**

ADRIANA LEGUIZAMÓN ROBAYO

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

Director

Libardo E. Mendoza Geney

Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2021

Nota De Aceptación:

Libardo E. Mendoza Geney
Firmar del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá, D.C. Febrero, 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de Universidad y Rector del Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones.

Dra. MARIA CLAUDIA APONTE GONZALEZ

Vicerrector administrativo y financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑA-ARANGO CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEJANDRA MEJIA GUZMAN

Decano de la Facultad de Ingenierías.

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería Mecánica.

Ing. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL

DEDICATORIA

A mis padres por ser ese apoyo incondicional. A mi hermano por motivarme cada día a dar lo mejor de mí y a mis mascotas que son mi alegría y mi polo a tierra.

AGRADECIMIENTOS

A cada uno de los docentes que hicieron parte de mi formación académica y me ayudaron a construir los conocimientos para este trabajo.

Al Dr.-Ing. Libardo Mendoza Geney, director del proyecto quien me brindó todo su apoyo, colaboración y motivación para el desarrollo las actividades teóricas de este trabajo.

Mil gracias.

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
1. GENERALIDADES	17
1.1. Ciclo Brayton	17
1.1.1. Ciclo Brayton simple	17
1.1.2. Ciclo Brayton con Interenfriamiento	19
1.1.3. Ciclo Brayton con recalentamiento	19
1.1.4. Ciclo Brayton con regeneración	19
1.2. Primera Ley de la Termodinámica	20
1.2.1. Balance de masa	21
1.2.2. Balance de energía	21
1.3. Segunda Ley de la termodinámica	22
1.3.1. Entropía	22
1.3.2. Balance de entropía	23
1.3.3. Eficiencia politrópica	23
1.3.4. Exergía	24
1.3.5. Balance de Exergía	25
1.4. Combustión	26
1.4.1. Balance estequiométrico	26
1.4.2. Masa Molar	27
1.4.3. Fracción Molar	27
1.4.4. Fracción Másica	27

1.4.5. Relación Aire – Combustible	28
1.4.6. Poder Calorífico	28
1.4.7. Biocombustibles	29
1.4.7.a. Propiedades de los combustibles	31
2. BALANCE DE MASA, ENERGÍA Y EXERGÍA DEL CICLO Y SUS EQUIPOS	32
2.1. Compresor	32
2.2. Cámara de Combustión	33
2.3. Turbina	34
2.4. Interenfriador, regenerador y recalentador	34
2.5. Herramienta computacional	35
2.5.1. Descripción herramienta computacional – CoolProp	35
2.5.2. Parámetros de entrada	36
2.5.2.a. Potencia de salida	37
2.5.2.b. Eficiencia Térmica	37
2.5.2.c. Consumo Térmico o Heat Rate	38
2.5.2.d. Relación de Presión	38
2.5.2.e. Flujo másico a la salida	38
2.5.2.f. Temperatura de salida	38
2.5.2.g. Condiciones ambientales	38
2.6. Análisis Teórico del Ciclo brayton	38
2.6.1. Análisis teórico ciclo básico	39
2.6.2. Análisis teórico ciclo compuesto	41
3. Análisis de combustión	43
3.1. Propiedades para el análisis	43
3.2. Análisis del ciclo Brayton con combustión	44

3.2.1. Análisis ciclo real	45
3.2.1.a. Gas Propano	46
3.2.1.b. Biogás	48
3.2.1.c. Gas de Síntesis	49
3.2.2. Resultados del análisis de combustión	50
4. COMPARATIVO CON LITERATURA	54
5. ANÁLISIS TERMOECONÓMICO	58
6. UTILIDAD E IMPACTO	61
CONCLUSIONES	62

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ciclo brayton simple	18
Figura 2. Turbina de gas SGT – 100	18
Figura 3. Ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración	20
Figura 4. Producción de biogás	29
Figura 5. Obtención del gas de síntesis	30
Figura 6. Interfaz CoolProp	36
Figura 7. Interfaz de modelo termodinámico	36
Figura 8. Ciclo Brayton Básico	39
Figura 9. Diagrama T - s de un ciclo Brayton simple	41
Figura 10. Ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración	42
Figura 11. Diagrama T - s de un ciclo Brayton compuesto	42
Figura 12. Diagrama T - s de un ciclo Brayton simple con propano	47
Figura 13. Diagrama T - s de un ciclo Brayton simple con biogás	49
Figura 14. Diagrama T - s de un ciclo Brayton simple con gas de síntesis	50
Figura 15. Eficiencia politrópica por combustibles	51
Figura 16. Flujo másico necesario por combustible	52
Figura 17. Exergía destruida por combustible	53
Figura 18. Tasa de destrucción de exergía en los componentes de las plantas GT-MHR y GT-MHR / ORC en comparación con la exergía de entrada	55
Figura 19. Temperatura de salida en función de la eficiencia politrópica	56
Figura 20. Eficiencia térmica y exergética en función de radio de compresión	56
Figura 21. Efectos del RC en la eficiencia del ciclo	57

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Eficiencia politrópica	24
Tabla 2. Comparativo entre energía y exergía	24
Tabla 3. Propiedades del propano, biogás y gas de síntesis	31
Tabla 4. Balance de masa, energía y exergía del compresor	33
Tabla 5. Balance de masa energía y exergía de la cámara de combustión	33
Tabla 6. Balance de masa energía y exergía para la turbina	34
Tabla 7. Balance de masa, energía y exergía por equipo	35
Tabla 8. Ficha Técnica Turbina SGT – 100	37
Tabla 9. Propiedades termodinámicas calculadas para el aire	40
Tabla 10. Propiedades de combustibles	43
Tabla 11. Masa molar y constante de gas	44
Tabla 12. Calor específico de un gas ideal en función de la temperatura	45
Tabla 13. Propiedades Termodinámicas calculadas para el propano	47
Tabla 14. Estados Termodinámicos para el Biogás	48
Tabla 15. Estados Termodinámicos para el gas de síntesis	50
Tabla 16. Gases de combustión expulsados a la atmosfera	51
Tabla 17. Perdidas por equipo mensuales	58
Tabla 18. FC respecto al propano	59
Tabla 19. Costo de pérdidas totales por mes.	60

LISTA DE SÍMBOLOS

“En el proyecto se utilizó el sistema internacional”

“,” para decimales y “.” para miles

Símbolo	Definición [Unidad]
<i>Ex</i>	Exergía. [KW]
<i>h</i>	Entalpía. [kJ/kg]
<i>m</i>	Masa. [kg]
<i>P</i>	Presión. [Atm, bar, kPa]
<i>Q</i>	Calor. [GJ/h]
<i>RC</i>	Relación de presiones. [Adimensional]
<i>s</i>	Entropía. [kJ/kg K]
<i>T</i>	Temperatura. [K o °C]
<i>u</i>	Energía interna específica. [kJ/kg]
<i>W</i>	Trabajo. [KW]

Subíndices

<i>i</i>	Propiedad en estado inicial.
<i>k</i>	Equipo k del esquema tecnológico.
<i>gen</i>	Propiedad generada
<i>s</i>	Propiedad en estado final
<i>t</i>	Propiedad reversible.
<i>o</i>	Propiedad muerta.

Letras griegas

ε	Eficacia. [Adimensional]
η	Eficiencia. [Adimensional]
μ	Restricción del modelo de optimización. [Adimensional]

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un balance de masa, energía y exergía para un ciclo de generación de potencia Brayton con el fin de evaluar la relación entre la relación de compresión (RC) y la eficiencia del ciclo, así también, las pérdidas por irreversibilidades respecto al combustible utilizado. Se desarrolla una herramienta computacional, estudiando las variables y parámetros que influyen en el ciclo de potencia y en cada uno de los procesos que lo componen (compresión, combustión y expansión). Para llevar a cabo este objetivo, es necesario realizar un balance de masa, energía y exergía para cada equipo que haga parte del sistema. Se realizarán análisis a un ciclo de potencia Brayton simple como también para un ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración y se evalúan bajo las condiciones tomadas de una turbina comercial Siemens SGT – 100.

A continuación, se realiza el análisis de combustión, para ello se deben caracterizar las alternativas de combustible que son el gas propano, biogás y gas de síntesis. El complementar los balances de masa, energía y exergía anteriores con los resultados de la combustión, permite cuantificar las pérdidas globales de calor y la eficiencia de los equipos determinando que combustible es más eficiente y cual disminuye las emisiones al medio ambiente. Se realiza un comparativo económico respecto a las pérdidas de cada combustible para dimensionar el costo de las pérdidas por irreversibilidades.

Se concluye que la cámara de combustión representa el 80% de las pérdidas totales por irreversibilidades, este comportamiento se replica utilizando las tres alternativas de combustibles mencionadas. Se concluye también que el biogás es una alternativa viable para el reemplazo de combustibles como el propano al disminuir las emisiones de CO₂ en un 75% y presentar una disminución del 15% en las pérdidas de la cámara de combustión.

PALABRAS CLAVE: Exergía, Ciclos de Potencia, Ciclo Brayton, Energías Alternativas

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el crecimiento de las industrias y el aumento de la población mundial generan una demanda energética que crece día a día, por lo que para lograr satisfacerla es necesario consumir más recursos naturales lo que conlleva un agotamiento acelerado de los mismos. De igual manera una de las principales causas del cambio climático, que afecta la disponibilidad de los recursos naturales, son los gases efecto invernadero, estos se producen en gran medida en los procesos tradicionales para la generación de energía eléctrica. Para el 2016, solo el 24,5% de la energía eléctrica generada a nivel mundial provenía de fuentes renovables, lo que conlleva a pensar en nuevas tecnologías para mitigar el impacto ambiental causado por la generación de energía eléctrica. [1]

Los esfuerzos para disminuir el efecto negativo de las fuentes de energía convencionales que producen la mayor carga de emisiones de efecto invernadero se concentran en dos focos de estudio: el uso de fuentes renovables de energías y el uso de tecnologías con alta eficiencia energética. Los procesos de optimización de los sistemas convencionales de energía permiten identificar las fuentes de pérdidas de energía lo cual conlleva a disminuir el gasto energético y de este modo reducir la carga de emisiones en estos procesos. A través de los procesos de optimización se identifica la capacidad de aprovechamiento de la energía de acuerdo con las variables que se modifiquen en los procesos convencionales de producción de energía tales como los ciclos de potencia.

Los ciclos de potencia tradicionales siguen siendo ampliamente utilizados, entre ellos se encuentra el ciclo Brayton [2]. Un ciclo de potencia Brayton consiste en introducir aire a condiciones ambiente dentro de un compresor, en donde su temperatura y presión se elevan. Luego el aire a alta presión se dirige a la cámara de combustión, donde se realiza la quema de combustible a una presión constante. Finalmente, los gases a alta temperatura que se generan entran a la turbina, en donde se expanden a medida que van perdiendo presión hasta llegar a la atmosférica, produciendo potencia. Para

augmentar la eficiencia de este ciclo se pueden realizar modificaciones por medio de la adición de equipos como interenfriadores, recalentadores y regeneradores.

Para los procesos de diseño, evaluación, optimización y mejora de centrales térmicas se utilizan análisis energéticos únicamente, lo que resulta insuficiente a la hora de determinar las irreversibilidades y las pérdidas de cada componente. Además, al tener en cuenta la problemática ambiental, se evalúa el uso de biocombustibles para la operación, con el fin de contribuir a la disminución de las emisiones de gases.

El presente proyecto busca realizar un análisis energético y exergético de un sistema de producción de energía a través de ciclos de potencia Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración. Se requiere realizar un balance de masa y energías para el ciclo tradicional, y se busca realizar el análisis para el mismo ciclo modificando el combustible utilizado. Se realizan los análisis del proceso de combustión para los biocombustibles generados a partir de biomasa residual. Una vez se obtienen dichos resultados se llevará a cabo un análisis para poder compararlos con la literatura e igualmente poder realizar una evaluación termoeconómica.

El primer objetivo tiene como fin desarrollar una actividad académica del área de máquinas térmica al introducir el ciclo Brayton ideal y tomar datos ideales, representando un ejercicio netamente teórico. Sin embargo, el proyecto permite una evolución desde lo teórico hasta la aplicación de la herramienta computacional creada. Se logra desarrollar una herramienta personalizada utilizando Software sencillo para su desarrollo, obteniendo resultados acordes a los cálculos realizados de la forma teórica.

La aplicación de la herramienta computacional no solo incluye un análisis de estados termodinámicos, sino que presenta un análisis de combustión el cual se puede ajustar de acuerdo con las necesidades de cualquier planta, turbina o cliente, dando como enfoque una consultoría personalizada, generando información esencial para estudios de prefactibilidad, cálculos de implementación para prospectos de plantas energéticas y, especialmente, para el monitoreo y optimización de los procesos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis energético y exergético de un sistema de producción de energía a través de ciclos de potencia Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el balance de masa, energía y exergía de un ciclo de potencia Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración utilizando una herramienta computacional.
- Realizar el análisis de la combustión en el ciclo Brayton para diferentes tipos de combustibles (gas propano, biogás y gas de síntesis) e incluirlo en los balances de masa, energía y exergía.
- Llevar a cabo un análisis comparativo de los resultados obtenidos con información experimental disponible en la literatura.
- Llevar a cabo un análisis termo-económico del ciclo de potencia Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración.

1. GENERALIDADES

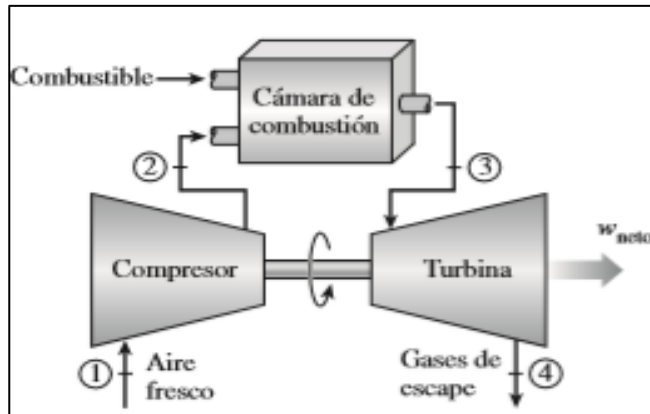
La termodinámica aplicada se puede dividir en dos áreas de enfoque, la generación de potencia y refrigeración. Los sistemas configurados para generación de potencia se denominan máquinas térmicas y los ciclos termodinámicos en los que operan se llaman ciclos de potencia. Dichos ciclos de potencia se definen como ideales en caso de que no se tener pérdidas de energía, por fricción, pérdidas de calor entre otros, y se denominan reales cuando estos factores son incluidos en el respectivo análisis termodinámico. La obtención energía eléctrica se realiza de manera general, de dos formas, por medio de ciclos de gas o ciclos de vapor, la diferencia anterior radica en el fluido de trabajo. Mientras que, en los ciclos de vapor el fluido de trabajo presenta cambios de fase, en los ciclos de gas el fluido de mantiene como gas durante todo el proceso. El ciclo Brayton es el ciclo de potencia que describe el funcionamiento de las turbinas de gas, ampliamente utilizadas a nivel industrial para la generación de potencia eléctrica [3].

1.1. Ciclo Brayton

1.1.1. *Ciclo Brayton simple*

Es un ciclo de generación de potencia que comprende principalmente tres equipos: un compresor, una cámara de combustión y una turbina en donde se obtiene la potencia de salida del ciclo. Aire bajo condiciones atmosféricas es comprimido en el compresor y transportado a la cámara de combustión, en la cámara de combustión se inyecta el combustible para incrementar su temperatura, finalmente, el aire llega a la turbina generando el movimiento de esta, a medida que se expande, su temperatura disminuye hasta terminar su recorrido y ser liberado a la atmosfera. Los gases a la salida de la turbina no recirculan, por lo que se define como un ciclo abierto.

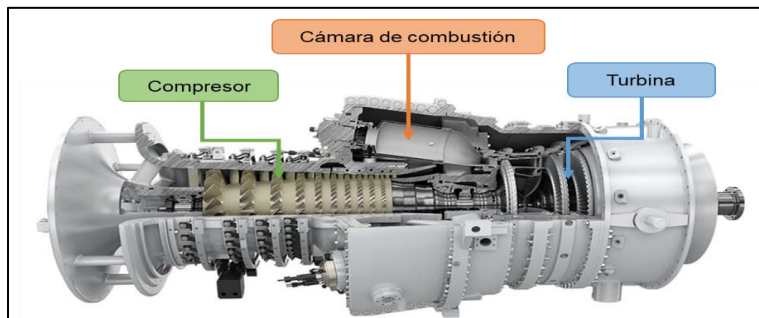
Figura 1.
Ciclo Brayton simple



Nota. La figura muestra los tres equipos básicos del ciclo Brayton. Tomado de: Y. Cengel. (2017). *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. 5ed. Nueva York: Mc Graw Hill, 491p.

La configuración de los equipos en una turbina de gas comercial es en línea (Figura 3), sin embargo, para una mejor descripción teórica se desglosa dicha configuración, como se muestra en la figura 1.

Figura 1.
Turbina de gas SGT – 100



Nota: Se muestra la distribución real de los equipos en una turbina Siemens. Tomado de: Siemens Gas and Power GmbH & Co. 2020 [En línea]. 2020. Disponible en: <https://new.siemens.com/global/en/>

La eficiencia térmica del ciclo de potencia se define como la relación entre la potencia producida (trabajo neto) y el calor de entrada, para incrementar esta eficiencia se pueden integrar equipos adicionales, tales como interenfriadores, recalentadores y regeneradores. A continuación, se describe cada uno de estos equipos.

1.1.2. Ciclo Brayton con Interenfriamiento

El trabajo neto del ciclo es la diferencia entre el trabajo producido por la turbina y el trabajo requerido por el compresor. Una manera de disminuir el trabajo del compresor, aumentar el trabajo neto y, por ende, la eficiencia térmica, es mantener el volumen específico del gas lo más bajo posible durante el proceso de compresión, que, al ser proporcional a la temperatura se concluye que se requiere enfriar el gas a la entrada del compresor. Al utilizar múltiples etapas con interenfriamiento el proceso de compresión se aproxima al proceso isotérmico, con lo que el trabajo de compresión disminuye. En la figura 4 se puede observar que al incluir el interenfriador se generan dos etapas de compresión, 1 – 2 y 3 – 4, en donde la relación de presión para cada etapa debe ser la misma

1.1.3. Ciclo Brayton con recalentamiento

El mismo principio de la compresión, aplica para la expansión del gas en ciclo. En este caso es necesario que el volumen específico sea lo más alto posible y para elevarlo se incluye un intercambiador o una cámara de combustión que adiciona calor, sin superar la temperatura máxima del ciclo, generando múltiples etapas de expansión, como se muestra en la figura 4, entre los estados 6 – 7 y 8 – 9.

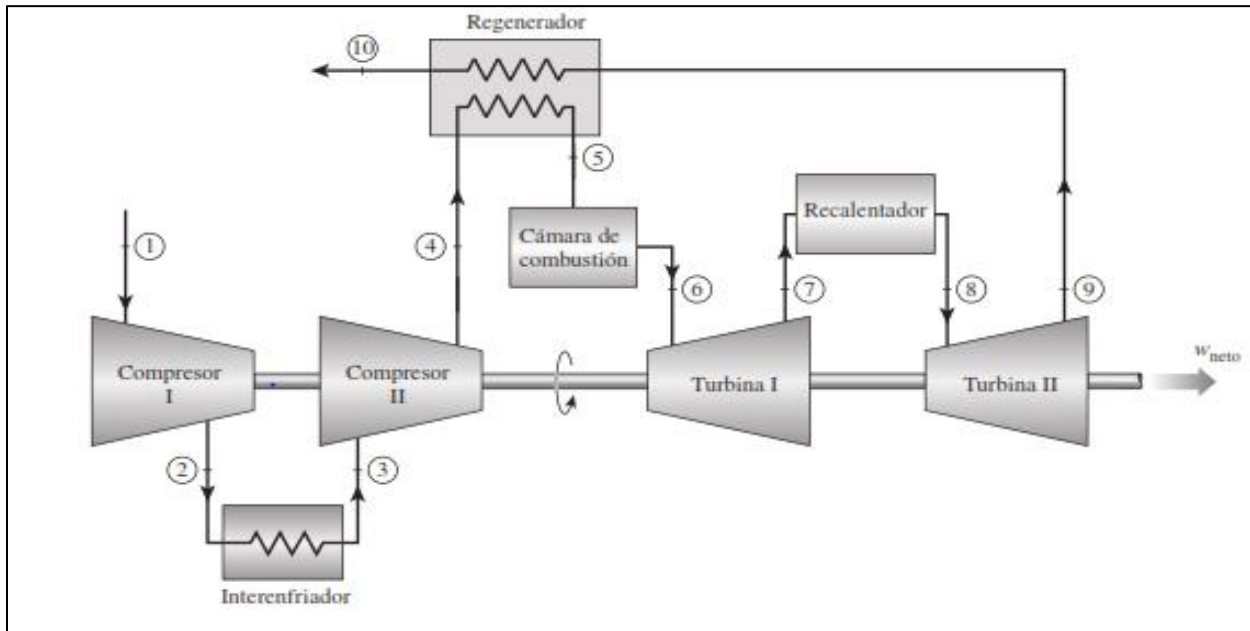
1.1.4. Ciclo Brayton con regeneración

La temperatura de los gases de escape suele ser mucho mayor a la temperatura del aire a la salida del compresor, por lo cual puede calentarse transfiriendo el calor presente de los gases mediante un intercambiador, conocido como regenerador o recuperador. Esto impacta la eficiencia del ciclo ya que al precalentar el aire disminuye el requerimiento de calor para llegar a la temperatura máxima del ciclo (definida por las propiedades del material), y a su vez de combustible, para un mismo trabajo neto. En la

figura 4, el proceso ocurre entre los estados 4 y 5. En el estado 4 el aire ingresa a una temperatura menor, con el calor que aporta la línea 9 – 10, es calentado hasta una temperatura 5, justo antes de la cámara de combustión.

Figura 2.

Ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración



Nota: La figura muestra los equipos del ciclo Brayton compuesto. Tomado de: Y. Cengel. (2017). Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. 5ed. Nueva York: Mc Graw Hill, 491p.

1.2. Primera Ley de la Termodinámica

Según Cengel, la primera ley de la termodinámica es la expresión del principio de la conservación de la energía, conocido también como balance de energía. El balance de masa y energía generales para cualquier sistema que experimenta cualquier proceso se puede expresar como la diferencia entre la energía a la entrada y a la salida del sistema. Primera ley de la termodinámica.

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (1)$$

Donde $E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}$ es la transferencia neta de energía, cambio en las energías interna, por calor, trabajo y masa, y $\Delta E_{\text{sistema}}$ es la variación en las energías interna, por calor, trabajo y masa cinética, potencial, en un intervalo de tiempo. [5]

1.2.1. Balance de masa

De acuerdo con la primera ley, se define que el balance de masa para un sistema es igual a la masa total que entra menos la masa total que sale. Es necesario caracterizar el ciclo como un sistema estacionario, es decir, sin variaciones respecto al tiempo, con esto se define la ecuación para el balance de masa como:

$$\sum_{\text{Entrada}} \dot{m} = \sum_{\text{Salida}} \dot{m} \quad (2)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico del sistema y la tasa total de masa que entra a un volumen de control es igual a la tasa total de masa que sale del mismo [5].

1.2.2. Balance de energía

Para un sistema de flujo estacionario, es decir sin variaciones respecto al tiempo, la energía de entrada del sistema es igual a la energía de salida de este. El balance de energía se define cómo:

$$\begin{aligned} Q_{\text{entrada}} + W_{\text{entrada}} + \sum \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \\ = Q_{\text{salida}} + W_{\text{salida}} + \sum \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde Q es el calor, W es el trabajo, \dot{m} es el flujo másico a la salida y entrada del sistema, h la entalpía del fluido, $V^2/2$ representa la energía cinética del fluido, y por último gz, la energía potencial.

La energía cinética y potencial de un flujo suelen ser insignificantes [5], por lo que al simplificar el balance y dividirlo por el flujo másico se obtiene:

$$q - w = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (4)$$

Donde q y w son la transferencia de calor y el trabajo hecho por unidad de masa del fluido de trabajo. Cuando el fluido no experimenta cambios elevados en su energía potencial y cinética, éstas se pueden asumir como cero, dando lugar a la expresión:

$$q - w = h_2 - h_1 \quad (5)$$

Es necesario aclarar que no toda la energía se encuentra disponible, es decir no toda puede transformarse en trabajo útil, lo que lleva a tener en cuenta la segunda ley de la termodinámica y una nueva propiedad: La entropía

1.3. Segunda Ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica establece que los procesos tienen una dirección, es decir que no son reversibles, y adicionalmente establece que la energía tiene tanto calidad como cantidad. Para realizar el balance es necesario introducir el concepto de entropía.

1.3.1. Entropía

Esta propiedad termodinámica está relacionada con el nivel organización de un sistema y cómo cambia de acuerdo con la temperatura de este. La entropía se puede definir cómo:

$$\Delta s = \int \frac{\delta q}{T} \quad (6)$$

Donde s la entropía, q el calor específico obtenido por un balance de energía y T la temperatura en unidades absolutas.

1.3.2. Balance de entropía

La entropía generada por un sistema permite cuantificar los efectos de las irreversibilidades, esto varía a lo largo de sistema y se establece que la entropía solo puede aumentar. El cambio de entropía en un sistema en un intervalo de tiempo es igual a la diferencia de la entropía a la entrada y la entropía a la salida, adicionando la entropía generada por el sistema. Al aplicarse para un sistema estacionario el balance se describe como:

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (7)$$

Donde \dot{S}_{gen} es la entropía generada del equipo o entropía por irreversibilidades. \dot{m}_e y \dot{m}_i son los flujos másicos de salida y entrada respectivamente y \dot{Q}_k/T_k es la entropía generada por transferencia de calor, la cual es cero en caso de que el sistema sea adiabático.

1.3.3. Eficiencia politrópica

En una turbina de gas, la eficiencia isoentrópica, se definen como el trabajo real y teórico de un equipo (compresor o turbina), sin embargo, varía de acuerdo con relación de compresión del equipo, lo que no permite una evaluación genérica. Al dividir los procesos de compresión y expansión en una serie de múltiples procesos de compresión y expansión consecutivos, cada uno tendrá su eficiencia isoentrópica, de esta surge la eficiencia politrópica, o de pequeñas etapas. Se puede asumir constante para la máquina, ya que es la verdadera eficiencia sin depender de la relación de compresión del equipo, por lo que resalta su utilidad a la hora de evaluar el rendimiento de la máquina y diseño de esta.

Tabla 1.

Eficiencia politrópica.

Turbina	Compresor
$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n_p(k-1)}{k}}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{n_p k}}$

Nota: La tabla muestra la relación para una turbina y un compresor.

Tomado de: M, Sa eid et al. (2015). Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. 3rd Edition. Gulf Professional Publishing, p 63.

La eficiencia politrópica puede ser expresada como la relación entre el aumento de temperatura ideal (dT') y el aumento de temperatura real (dT) de un proceso de compresión [6].

1.3.4. Exergía

La segunda ley tiene en cuenta una característica de la energía, su calidad, que no se logra describir únicamente con la primera ley. De este término surge la llamada disponibilidad o exergía.

Tabla 2.

Comparativo entre energía y exergía.

Energía	Exergía
Dependiente de las características del flujo involucrado de materia e independiente de las propiedades de los alrededores	Dependiente de las propiedades de materia, energía como los alrededores en el sistema o caso de estudio
Su valor es diferente de 0 en casos donde existe un equilibrio con el medio ambiente	Su valor es igual a 0 cuando el estado muerto se encuentra en total equilibrio con los alrededores.
Se conserva para todos los procesos basándose en la primera ley.	Se conserva en procesos reversibles, pero no en procesos reales. Se basa en la segunda

Tabla 2. Continuación

No es producida ni destruida, solo se conserva	No es producida ni destruida en procesos reversibles. Para en aquellos irreversibles siempre es consumida.
Expone una medida únicamente de cantidad.	Expone una medida tanto de cantidad como de calidad.

Nota: La tabla muestra la comparación entre la energía y exergía. Tomado de: Rosen, M. A. and I. Dincer, (2001). "Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development." Exergy, an International Journal. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1164023501000048>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(01\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(01)00004-8).

La exergía se define como el trabajo máximo que puede realizar un sistema hasta llegar al equilibrio con un estado ambiente o conocido mejor como Estado muerto. Se describe como:

$$Ex = (H - H_o) - T_o(S - S_o) \quad (8)$$

Donde H la entalpia de la corriente, S la entropía, T la temperatura y el subíndice o la propiedad en su estado muerto. La exergía tiene un principio de disminución el cual es proporcional a la generación de entropía con la interacción del estado muerto [8], definido cómo:

$$Ex_{dest} = T_o S_{gen} \quad (9)$$

Siendo Ex_{dest} la exergía destruida, T_o la temperatura del estado muerto y S_{gen} la entropía generada.

1.3.5. Balance de Exergía

Al combinar la primera y la segunda ley se tienen en cuenta, tanto la cantidad de energía en el sistema como las irreversibilidades de este. El balance de exergía se define

como exergía de entrada (ex_{st}) menos exergía de salida (ex_s) menos exergía destruida (Ex_{dest}), igual a la variación de la exergía con respecto al tiempo, que al ser estacionario se iguala a cero. Con esto el balance se define cómo:

$$\sum_{i=1}^{calores} Q_i \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right) - \dot{W} + \sum_{i=1}^{entradas} \dot{m}_i ex_i - \sum_{j=1}^{salidas} \dot{m}_s ex_s - Ex_{destruida} = 0 \quad (10)$$

1.4. Combustión

Según Cengel, cualquier material que pueda quemarse y liberar energía se denomina combustible [5]. La mayoría de los combustibles utilizados están compuestos por hidrogeno y carbono, recibiendo el nombre de hidrocarburos. Este tipo de combustibles pueden existir en todas las fases, entre ellos se destacan el carbón, la gasolina y el gas natural.

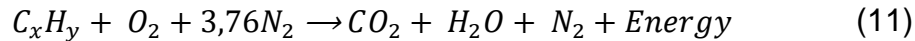
La combustión se define como la reacción química entre un combustible o material oxidable y el oxígeno, el material oxidable puede ser cualquier combustible, desde madera hasta gasolina, mientras que el oxígeno suele ser tomado del aire, sin embargo, existen situaciones en las que el oxígeno se toma de un gas viciado enriquecido. Está caracterizada por la generación de calor y la emisión de luz

El análisis de combustión consiste en realizar un balance químico de la reacción básica de cada combustible de acuerdo con su composición. Para este caso se asumirá como una combustión completa y únicamente se tendrán en cuenta los productos de la ecuación general, definida a continuación.

1.4.1. Balance estequiométrico

La estequiometria se puede definir como la medición y cálculo de las cantidades de los elementos presentes en una reacción química. La Ley de conservación de la masa, estipula que la masa antes, durante y después de la reacción se mantiene constante [9].

Para asegurarse de que la reacción cumpla con ella es necesario realizar un balance de masa. A continuación, se define la ecuación general para la combustión:



Si bien el nitrógeno presente no reacciona, se debe incluir ya que el oxígeno puro no puede ser obtenido de la atmósfera y se considera la composición del aire seco como 21% oxígeno y 79% de nitrógeno, por lo que cada mol de oxígeno que entre a una cámara de combustión estará acompañado por $0.79/0.21 = 3.76$ mol de nitrógeno [5]. En cuanto al combustible, debe considerarse con su composición neta. Existen diferentes métodos para realizar un balance de masa en una reacción, sin embargo, en este caso se utilizará el balance por tanteo. Este método consiste en modificar la cantidad de moles que entran de cada sustancia en la reacción.

1.4.2. Masa Molar

La masa molar de una mezcla (M_m) se define como la sumatoria de la fracción molar (y_i) multiplicada por la masa molar del componente individual (M_i) [5].

$$M_m = \sum y_i M_i \quad (12)$$

1.4.3. Fracción Molar

La fracción molar (y_i) se define como la relación en moles de un compuesto (N_i) entre el número total de moles de la solución (N_m). Esta relación es proporcional a la concentración volumétrica del compuesto. [5]

$$y_i = \frac{N_i}{N_m} \quad (13)$$

1.4.4. Fracción Másica

La fracción másica (f_{mi}) se define como la relación entre la masa de un compuesto (m_i) y la masa total de la solución (m_m) [5].

$$fm_i = \frac{m_i}{m_m} \quad (14)$$

1.4.5. Relación Aire – Combustible

La relación aire-combustible (AC) se define como la razón entre la masa del aire y la masa del combustible. Con ella obtenemos la cantidad mínima de aire requerida para que se complete la combustión [5].

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (15)$$

Esta relación nos permite calcular el coeficiente de exceso de aire Lambda (λ), el cual permite realizar un balance más aproximado al real ya que se multiplica por el número de moles de aire iniciales.

1.4.6. Poder Calorífico

El poder calorífico es la cantidad de energía liberada por una cantidad unitaria de combustible quemada a temperatura ambiente y los productos de la combustión son enfriados a temperatura ambiente. El poder calorífico se denomina Poder calorífico inferior (LHV) cuando el agua de la reacción se convierte en vapor, este define el flujo másico requerida que debe ingresar al ciclo. [5] Se puede definir cómo:

$$LHV = \frac{Q_i}{m_{fuel}} \quad (16)$$

Donde Q_i es el calor entregado por el combustible y m_{fuel} es el flujo másico del combustible.

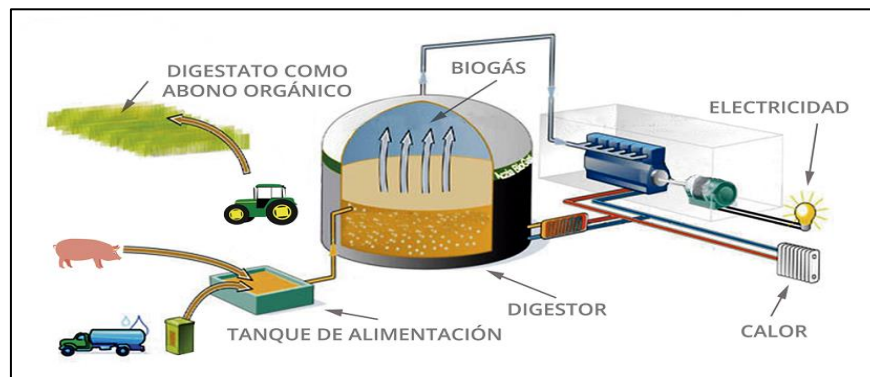
1.4.7. Biocombustibles

El consumo de combustibles fósiles ha incrementado en el último siglo y debido a su combustión han aumentado las emisiones de CO₂, CO, SO₂ y NO_x, las cuales son la principal causa de contaminación en Colombia [9]. Debido a la preocupación general por los recursos y a la disminución considerable de los yacimientos de petróleo, es una preocupación mundial la búsqueda de combustibles no-fósiles y renovables.

Las opciones actuales se concentran en fabricar biocombustibles a partir de plantas o aceites vegetales. Dentro de los más destacados se encuentra el Biodiesel, el Bioetanol, Biogás y el gas de síntesis.

El Biogás es el producto de una digestión anaeróbica de desechos orgánicos en ausencia de oxígeno. Es una mezcla que consiste principalmente de metano (CH₄) y CO₂. Las ventajas del biogás consisten en que la materia prima para su generación son desechos sólidos, como estiércol o aguas residuales [11].

Figura 3.
Producción de biogás.



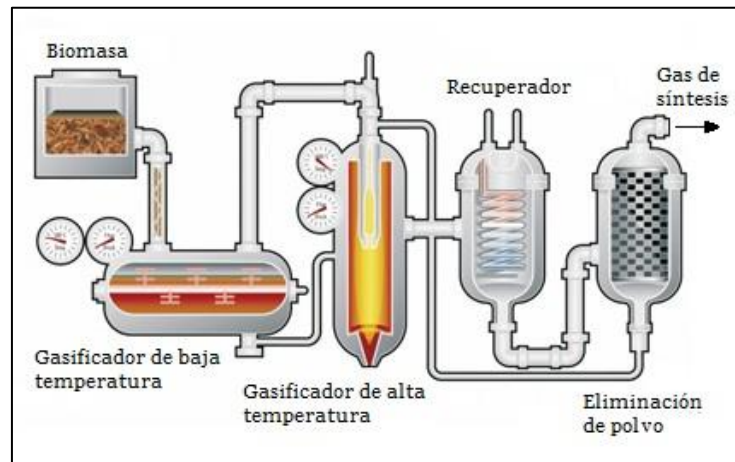
Nota: Proceso de producción del biogás a partir de biomasa. Tomado de: F, Eileen. Experiencia en la obtención de biogás. Agencia cubana de noticias. Disponible en: <http://www.acn.cu/images/2018/Junio/0619-producci%C3%B3nde-biog%C3%A1s.png>

La gasificación de biomasa es un método que ha llamado la atención ya que provee mejores eficiencias con relación a la combustión. De este proceso se producen principalmente una combinación de hidrogeno y monóxido de carbono, a esto se le conoce como gas de síntesis. El gas de síntesis de biomasa contiene 22-36% de CO, 22-32% de H₂, 21-30% de CO₂ y 8-11% de CH₄.

Este gas de síntesis se obtiene de biomasa como el residuo de materia orgánica y la formación de los productos de la gasificación depende del tipo de reactor y los oxidantes utilizados. Los productos más utilizados son el pasto, cáscara de arroz (Indonesia), residuos de la producción de aceite de soya y de girasol, bagazo de la producción de la caña de azúcar (Brasil) [12].

Figura 4.

Obtención del gas de síntesis



Nota: Proceso de obtención del gas de síntesis por medio de la gasificación de baja y alta temperatura. Tomado de: Producción de gas de síntesis (2016) Disponible en línea: <https://combustiblesalternativos.weebly.com/gas-de-siacutentesis.html>

1.4.7.a. Propiedades de los combustibles

Tabla 3.

Propiedades del propano, biogás y gas de síntesis

Combustible	Composición		LHV (KJ/kg)
Gas Propano	C ₃ H ₈	65%	45943,39
	C ₄ H ₁₀	35%	
Biogás	CH ₄	75%	37450,71
	CO ₂	25%	
Gas de Síntesis	H ₂	71,30%	17895
	CO ₂	20,50%	
	CO	7,80%	
	CH ₄	0,04%	

Nota: La tabla muestra los valores de las composición y del poder calífico inferior por combustible. Tomado de: Rednova, “Ficha técnica y hoja de datos de seguridad del glp”, 2018. Disponible en: <https://rednova.com.co/wp-content/uploads/2018/11/F0175-Ficha-tecnica-y-hoja-de-datos-de-seguridad-del-GLP.pdf>

2. BALANCE DE MASA, ENERGÍA Y EXERGÍA DEL CICLO Y SUS EQUIPOS

El análisis de energía es el método tradicional para evaluar la forma en que la energía es utilizada en un proceso. Está basado únicamente en la primera ley, que establece que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma. Sin embargo, no logra explicar los aspectos de reversibilidad de los procesos termodinámicos. Un balance energético tampoco puede explicar la degradación de la energía o los recursos durante un proceso y no cuantifica la utilidad o la calidad de la energía y las cantidades de material (por ejemplo, flujos de entrada, producto y desechos para un sistema) [15]. El utilizar la exergía supera las limitaciones del anterior balance, ya que utiliza la segunda ley y logra identificar el lugar y causa para la degradación de la energía, por lo que su objetivo principal es proporcionar eficiencias significativas, causas y magnitudes de las pérdidas exergéticas.

A continuación, se describen los equipos y balances para el ciclo Brayton simple y compuesto (interenfriamiento, regeneración y recalentamiento).

2.1. Compresor

Las turbinas de gas utilizan un compresor axial, donde se realiza la admisión del aire. Tienen un mayor rendimiento comparados a los compresores centrífugos. En este tipo de compresores el aire fluye en dirección axial, a través de los alabes ubicados alrededor del rotor. Incrementa la presión de fluido al ir disminuyendo su área de sección transversal. Para el análisis se considera un equipo adiabático, es decir que no existe intercambio de calor con sus alrededores.

Tomando como nomenclatura de los estados los definidos en la figura 3, continuación se encuentran los balances de masa, energía y exergía de los compresores.

Tabla 4.*Balance de masa, energía y exergía del compresor.*

Balance	Compresor 1	Compresor 2
Masa	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$
Energía	$W_{C1} = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$	$W_{C2} = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$
Exergía	$\dot{m}_1 ex_1 + W_{C1} = \dot{m}_2 ex_2 + ex_{desC1} \quad \dot{m}_3 ex_3 + W_{C2} = \dot{m}_4 ex_4 + ex_{desC2}$	

Nota: La tabla muestra los balances de masa, energía y exergía para un compresor del ciclo Brayton realizados teóricamente.

2.2. Cámara de Combustión

En una cámara de combustión, un combustible, ya sea líquido o gaseoso, es inyectado a la zona de combustión a alta presión hasta generar un chorro, que al combinarse con aire logra reaccionar generando gases de combustión como fluido de trabajo posterior al mismo. Se considera un equipo isobárico, es decir, de presión constante. Las ecuaciones se muestran a continuación.

Tabla 5.*Balance de masa energía y exergía de la cámara de combustión.*

Balance	Cámara de combustión
Masa	$\dot{m}_6 = \dot{m}_5 + \dot{m}_f$
Energía	$\dot{Q}_{56} = \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_5 h_5$
Exergía	$\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{56} + \dot{m}_5 ex_5 = \dot{m}_6 ex_6 + Ex_{desCC}$

Nota: La tabla muestra los balances de masa, energía y exergía calculados para la cámara de combustión.

2.3. Turbina

La turbina es un equipo rotatorio que transforma energía cinética a energía mecánica, a través de un eje. Cuenta con una serie de álabes fijos y móviles los cuales, al ser movidos por el fluido de trabajo mientras se expande, hacen girar el eje. Para la generación de potencia este eje se conecta a un generador. Este equipo también es considerado como adiabático y sus ecuaciones de balance son las siguientes.

Tabla 6.

Balance de masa energía y exergía para la turbina.

Balance	Turbina 1	Turbina 2
Masa	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7$	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$
Energía	$W_{T1} = \dot{m}_6(h_6 - h_7)$	$W_{T2} = \dot{m}_8(h_8 - h_9)$
Exergía	$\dot{m}_6 ex_7 - W_{T1} = \dot{m}_7 ex_7 + ex_{desT1}$	$\dot{m}_8 ex_8 - W_{T2} = \dot{m}_9 ex_9 + ex_{desT2}$

Nota: La tabla muestra los balances de masa, energía y exergía calculados para la turbina.

2.4. Interenfriador, regenerador y recalentador

Este equipo solo se encuentra en el ciclo Brayton compuesto, permite disminuir la temperatura (Interenfriamiento) entre las dos etapas de compresión y también se utiliza para calentar el aire antes de entrar a la cámara de combustión (regeneración). Para el intercambiador es necesario tener en cuenta la eficacia o efectividad (ϵ) [5]. Esta se define cómo:

$$\epsilon = \frac{q_{real}}{q_{max}} \quad (17)$$

Tabla 7.*Balance de masa, energía y exergía por equipo.*

EQUIPO	MASA	ENERGÍA	EXERGÍA
Compresor	$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$	$W_C = \dot{m}_{in} \Delta h$	$ex_1 + W_{C1} = ex_2 + ex_{DC1}$
Cámara de combustión	$\dot{m}_{cc} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{comb}$	$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}_c h_c - \dot{m}_a h_a$	$\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_{cc} + ex_5 = ex_6 + ex_{DCC}$
Turbina	$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$	$W_T = \dot{m}_{in} \Delta h$	$ex_{in} - ex_{out} = W_T + ex_{DT}$
Intercambiador	$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$	$\Delta h_1 = \Delta h_2$	$\Delta ex_1 = \Delta ex_2 + ex_{DInt}$

Nota: La tabla muestra los balances de masa, energía y exergía calculados para cada equipo del ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración.

2.5. Herramienta computacional

2.5.1. Descripción herramienta computacional – CoolProp

Para realizar simulaciones de ciclos termodinámicos se requiere acceso a las propiedades termodinámicas de los mismos, sin embargo, puede ser difícil intentar obtener esta información, sobre todo para fluidos orgánicos, como el caso de este análisis, por lo que se hace necesaria la utilización de la librería *CoolProp*. Esta es una base de datos de código abierto de propiedades termodinámicas para diferentes fluidos, es compatible con diferentes sistemas operativos y para fines de este análisis se utilizó como una extensión de Microsoft Excel.

El algoritmo de esta librería se basa principalmente en la ecuación de Gibbs–Helmholtz, utilizada para calcular los cambios de energía en un sistema en función de la temperatura. De esta ecuación de estado se pueden obtener todas las propiedades termodinámicas de interés derivando parcialmente la energía Helmholtz [16].

Figura 5.

Interfaz CoolProp

Property Calculator	
Fluid Type	PureFluids
Fluid	Water
Output Name	Hmass
Input Name 1	T
Input Value 1	400
Input Name 2	Q
Input Value 2	1
Result	2.715.703,7520

Nota: La figura muestra la interfaz de CoolProp disponible en Excel.

Figura 7.

Interfaz de modelo termodinámico.

Parámetros de Ficha Técnica		
Potencia de Salida	5,05	MWelec
Eficiencia Térmica	0,302	-
Consumo Térmico	11914	KJ/kg
Relación de Presiones	14	-
Flujo másico a la salida	19,5	kg/s
Temperatura de Salida	545	°C
Combustible	Gas de Síntesis	

- Aire
- Propano
- Biogás
- Gas de Síntesis

Nota: La figura muestra los parámetros de entrada del modelo termodinámico.

2.5.2. Parámetros de entrada

El desarrollo del análisis se lleva a cabo tomando los parámetros de entrada de una turbina industrial, dichos datos se obtienen de la ficha técnica de cada turbina y pueden ser intercambiados de acuerdo con el modelo a analizar. La referencia selecciona fue la Siemens SGT – 100, cuya potencia, eficiencia consumo, entre otros se describen al detalle en la Tabla 2.

Tabla 8.

Ficha Técnica Turbina SGT – 100.

Característica	Valor	Unidades
Potencia de Salida	5,05	MWelec
Eficiencia Térmica	0,302	-
Consumo Térmico	11914	KJ/kg
Relación de Presiones	14:01	-
Flujo másico salida	19,5	kg/s
Temperatura de Salida	545	°C

Nota: Se muestra la distribución real de los equipos en una turbina Siemens. Tomado de: Siemens Gas and Power GmbH & Co. 2020 [En línea]. 2020. Disponible en: <https://new.siemens.com/global/en/>

Adicional a los datos obtenidos por la ficha técnica, es necesario alimentar la herramienta computacional con datos teóricos obtenidos de los libros de termodinámica [5] estos parámetros, como la constante del aire (k) y las condiciones iniciales se tienen en cuenta en el análisis de combustión, por lo que se detallarán más adelante.

2.5.2.a. Potencia de salida. La potencia de salida se define cómo el trabajo total real que puede ejercer la turbina. Su unidad es dada MWelec.

2.5.2.b. Eficiencia Térmica. La eficiencia neta que se describe en la ficha técnica es también conocida como la eficiencia térmica del ciclo [5], la cual se define a partir de la primera Ley de la termodinámica cómo:

$$n_{th} = \frac{W_{neto}}{Q_{in}} \quad (18)$$

Donde n_{th} es la eficiencia térmica del sistema, W_{neto} es el trabajo neto de salida y Q_{in} es la entrada de calor total.

2.5.2.c. Consumo Térmico o Heat Rate. Es la entrada de calor total sobre la salida de potencia eléctrica del sistema. Sus unidades en el sistema internacional son KJ/KWh [17].

$$\text{Consumo Térmico} = \frac{\text{Energía de entrada (KJ)}}{\text{Potencia Electrica de Salida (KWh)}} \quad (19)$$

2.5.2.d. Relación de Presión. La relación de presión se define como la relación entre la presión final y la presión inicial de un equipo. Al igual que las anteriores características es dada por la ficha técnica de la turbina.

$$r_p = \frac{\text{Presión de salida}}{\text{Presión de entrada}} \quad (20)$$

2.5.2.e. Flujo másico a la salida. Es el flujo másico medido a la salida de la turbina. Este es el flujo másico total, por lo que para efectos de análisis es necesario identificar el flujo másico respectivo para el aire y para el combustible. Sus unidades en SI son Kg/s.

2.5.2.f. Temperatura de salida. Este valor es obtenido de la ficha técnica de cualquier equipo y es medido a la salida de la turbina, es decir que los gases de combustión sales a esta temperatura.

2.5.2.g. Condiciones ambientales. De acuerdo con la guía propuesta por Cengel [5] y para facilidades de cálculos se toman como condiciones ambientes o de estado muerto T_o y la P_o como 298 K y 100 KPa respectivamente, con el fin de realizar nuestro análisis exegético.

2.6. Análisis Teórico del Ciclo brayton

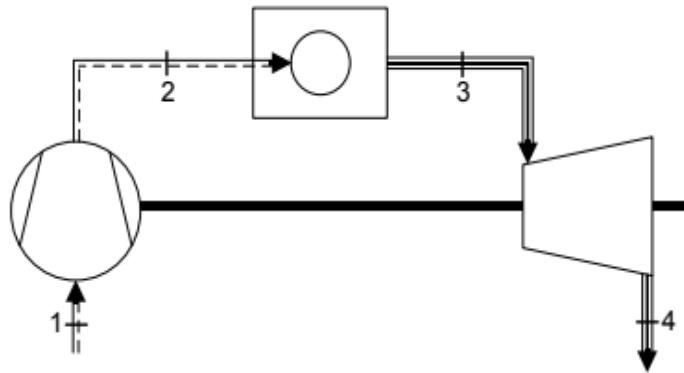
Para dar cumplimiento al primer objetivo en su totalidad y con fines académicos, se realizó un primer balance de masa, energía y exergía utilizando solo el aire como fluido de trabajo, incluso después de la cámara de combustión.

2.6.1. Análisis teórico ciclo básico

El análisis teórico del ciclo consistirá en realizar el análisis energético y exergético para el ciclo y cada uno de los equipos. Para ello es necesario identificar las propiedades termodinámicas requeridas (temperatura, presión, entalpía, entropía) en cada estado del equipo.

Figura 7.

Ciclo Brayton simple



Nota: Diagrama representativo de un ciclo brayton simple. Tomado de: [18] Mendoza, L “Ciclos de potencia a gas” [Diapositivas] p 6. Email personal (Julio 6, 2019)

La presión y temperatura en el estado 1 se toman, como previamente describimos como 298K y 100Kpa, con éstos dos valores es posible obtener la entalpía y entropía por tablas termodinámicas.

Con la relación de presiones, que para el caso es 14:1, se obtiene la presión en el punto dos y la temperatura es posible hallar la con la ecuación 14, eficiencia isoentrópica del compresor

Utilizando el balance de energía para la cámara de combustión se obtiene la temperatura en el estado 3.

El calor de entrada se obtiene despejándolo de la ecuación del consumo térmico.

Con el estado 4 definido y tomando la misma presión ambiente a la salida, se puede determinar la eficiencia politrópica de la turbina (ecuación 15).

Se itera hasta obtener la misma eficiencia tanto en la turbina como en el compresor ya que esto significa que el ciclo se acerca a un funcionamiento real.

Por último, se valida el modelo comparándolo con los cálculos manuales.

Tabla 9.

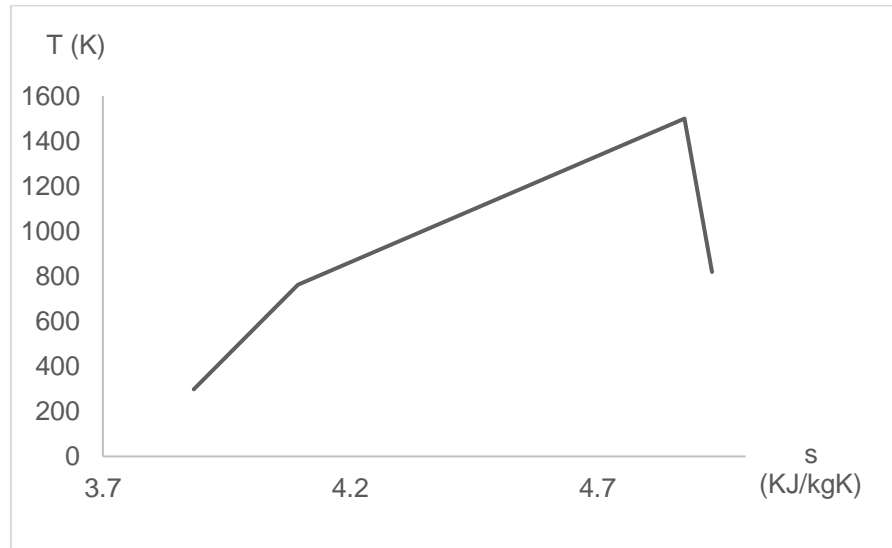
Propiedades termodinámicas calculadas para el aire

Estado	Fluido	T	P	\dot{m}	h	s	ex - ψ
		(K)	(KPa)	(Kg/s)	(KJ/Kg)	(KJ/Kg K)	(KJ/Kg)
1	Aire	298	100	19,5	424,2881	3,8838	0,0000
2	Aire	761,2218	1950	19,5	906,3209	4,0945	419,2490
3	Aire	1499,9110	1950	19,5	1763,3822	4,8768	1043,1815
4	Aire	818,15	100	19,5	968,3856	4,9319	231,7448

Nota: La tabla muestra las propiedades termodinámicas calculadas para cada uno de los estados del ciclo simple, tomando solo aire como fluido.

Figura 8.

Diagrama $T - s$ de un ciclo Brayton simple



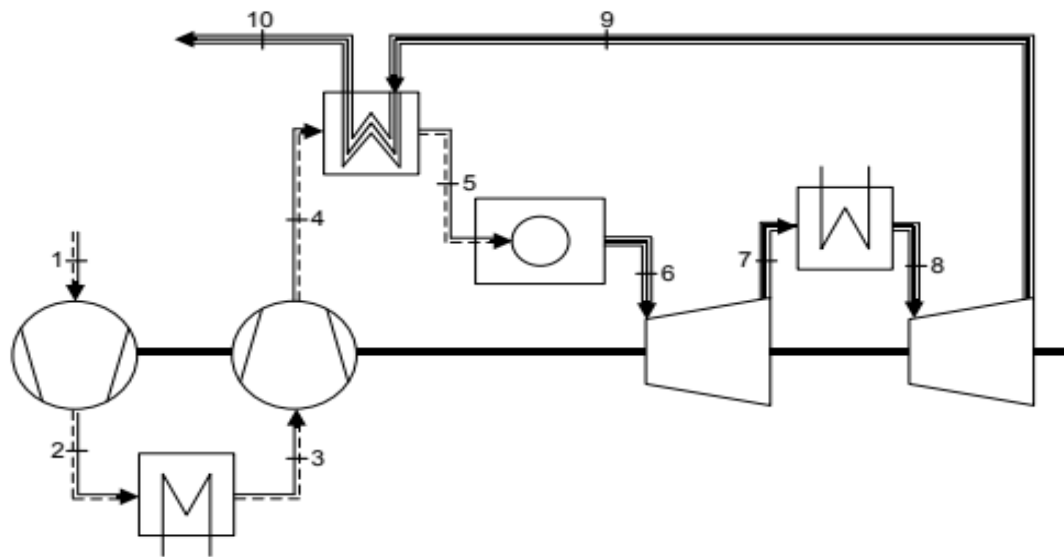
Nota: La figura muestra el diagrama de temperatura vs entropía graficando los 4 estados obtenidos con la herramienta computacional.

2.6.2. Análisis teórico ciclo compuesto

Tal cómo se muestra en a la figura siguiente, se realizó el análisis incluyendo los equipos complementarios al ciclo Brayton simple.

Figura 9.

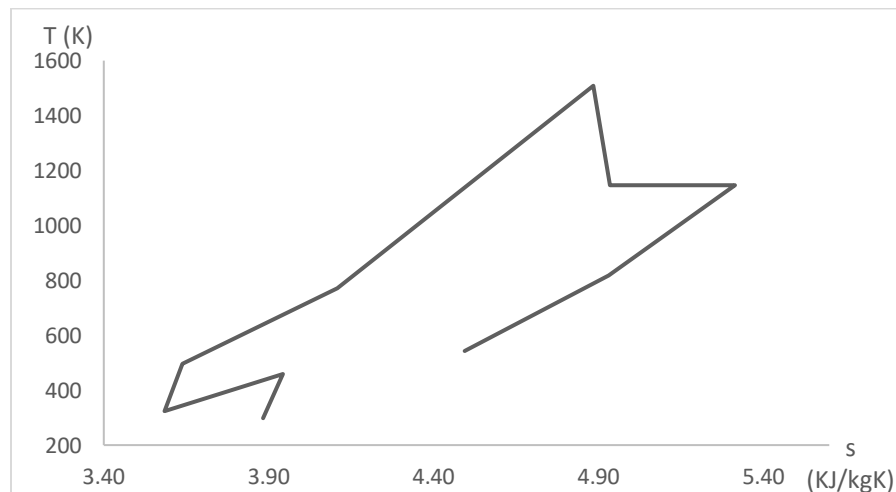
Ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración



Nota: Gráfica representativa de un ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración. Tomado de: Mendoza, L. "Taller Ciclo Brayton" [Archivo PDF], p 6. Email personal [Junio 15, 2019]

Figura 10.

Diagrama T - s de un ciclo Brayton compuesto.



Nota: La gráfica muestra la entropía generada en un ciclo compuesto.

3. ANÁLISIS DE COMBUSTIÓN

3.1. Propiedades para el análisis

Para realizar el análisis de combustión es necesario identificar las composiciones de los combustibles a utilizar.

Tabla 10.
Propiedades de combustibles.

Combustible	Composición		LHV (KJ/kg)
Gas Propano	C ₃ H ₈	65%	45943,39
	C ₄ H ₁₀	35%	
Biogás	CH ₄	75%	37450,71
	CO ₂	25%	
Gas de Síntesis	H ₂	71,30%	17895
	CO ₂	20,50%	
	CO	7,80%	
	CH ₄	0,04%	

Nota: La tabla muestra la composición y el poder calórico de cada combustible. Tomado de: Gupta, K. K., A. Rehman and R. M. Sarviya, (2010). "Bio-fuels for the gas turbine: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002054>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.025>

Para continuar con el desarrollo también se describen propiedades de fluidos relevantes, con el fin de allá la masa y fracción molares.

Tabla 11.*Masa molar y constante de gas.*

Sustancia	Fórmula	Masa molar	Constante del Gas
		M (kg/kmol)	R (KJ/kgK)
Aire	-	28,97	0,287
Agua	H ₂ O	18,015	0,4615
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,01	0,1889
Hidrogeno	H ₂	2,016	4,124
Metano	CH ₄	16,043	0,5182
Monóxido Carbono	CO	28,011	0,2968
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,143
Nitrógeno	N ₂	28,013	0,2968
Oxigeno	O ₂	31,999	0,2598
Propano	C ₃ H ₈	44,097	0,188

Nota: La tabla contiene los valores de la masa molas y la constante R de cada sustancia. Tomado de: Y. Cengel. (2017). Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. 5ed. Nueva York: Mc Graw Hill, 491p.

3.2. Análisis del ciclo Brayton con combustión

Para el análisis de combustión es necesario resaltar que se efectuará únicamente para el ciclo básico, ya que como se evidenció en el análisis anterior, utilizando solo aire como fluido de trabajo, se evidenció que la eficiencia exergética es mayor en ciclo simple. Adicionalmente es necesario resaltar que la configuración de las turbinas comerciales únicamente incluye los tres equipos básicos, por lo que el análisis de combustión se tomará acercándose lo mayor posible al comportamiento real de este dispositivo.

3.2.1. Análisis ciclo real

El análisis de combustión se realiza con el fin de encontrar el Cp y h en función de las propiedades de los gases para obtener la temperatura a la salida de la cámara de combustión, por lo que la temperatura se tomará en función de la entalpía y del calor específico a presión constante.

$$h = Cp * T \quad (22)$$

$$\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (23)$$

Tabla 12.

Calor específico de un gas ideal en función de la temperatura.

Sustancia	Fórmula	a	b	c	d
Aire	-	28,11	0,1967x10 ⁻²	0,4802x10 ⁻⁵	-0,1966x10 ⁻⁹
Agua	H ₂ O	32,24	0,1923x10 ⁻²	1,055x10 ⁻⁵	-3,595x10 ⁻⁹
Dióxido de Carbono	CO ₂	22,26	5,981x10 ⁻²	-3,501x10 ⁻⁵	7,469x10 ⁻⁹
Nitrógeno	N ₂	28,29	-0,1571x10 ⁻²	0,8081x10 ⁻⁵	-2.873x10 ⁻⁹
Oxígeno	O ₂	25,48	1,520x10 ⁻²	-0,7155x10 ⁻⁵	1,312x10 ⁻⁹

Nota: Constantes para calcular el calor específico Cp para cada sustancia.

Tomado de: Y. Cengel. (2017). Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. 5ed. Nueva York: Mc Graw Hill, 491p.

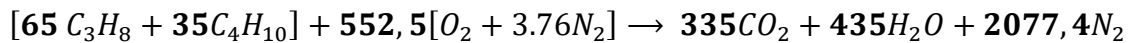
Con esté Cp en proporción a los gases de combustión se halla la temperatura, esto se logra iterando hasta lograr que la entalpía obtenida por el balance de energía en la cámara de combustión sea la misma obtenida por la ecuación xx.

El proceso para realizar el análisis es esencialmente el mismo que al utiliza solo aire como fluido de trabajo, sin embargo, se inicia hallando el flujo másico del combustible utilizando la ecuación del poder calorífico inferior.

Para se utiliza el balance de energía teniendo en cuenta que el calor depende del flujo másico tanto de aire como del combustible. Al despejar se obtiene el valor de entalpía en el estado 3. Una vez obtenido el valor es necesario obtener la fracción másica de cada uno de los gases de combustión considerados (CO₂, H₂O y N₂)

Para ello se requiere realizar el balance de acuerdo con la composición de cada combustible.

3.2.1.a. Gas Propano. Partiendo de la ecuación general para la combustión y sustituyendo los componentes de acuerdo con la composición del propano se obtiene el siguiente balance:

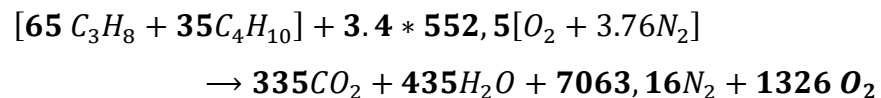


Con el balance se obtiene la fracción molar y la masa de molar de cada compuesto. Posteriormente se utiliza la relación Aire-Combustible para determinar el exceso de aire que hay en la reacción de acuerdo con los flujos másicos de entrada.

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = \frac{552,5 * 4.76 kmol * 28.97 kg/kmol}{65 * 44.097 kg/kmol + 35 * 58.124 kg/kmol} = 15.5546 \frac{kg_{aire}}{kg_{comb}}$$

$$\lambda = \frac{m_{aire}}{AireMinimo * m_{combustible}} = 3,3837$$

Una vez obtenido el aire mínimo, se debe multiplicar el factor lambda por las moles de airea en el balance inicial. Dando como resultado:



Con ello se obtiene la composición de los gases de combustión y los respectivos estados termodinámicos

Tabla 13.

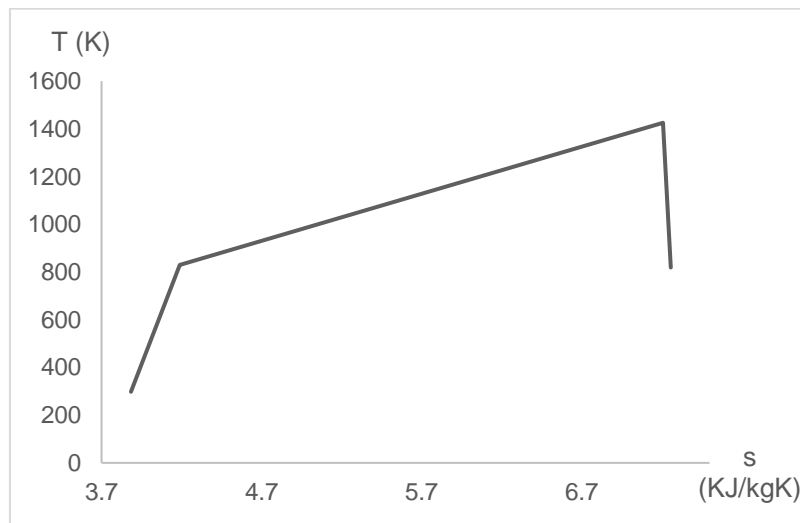
Propiedades Termodinámicas calculadas para el propano.

Estado	Fluido	T (K)	P (KPa)	\dot{m} (Kg/s)	H (KJ/Kg)	S (KJ/Kg K)	ex - ψ (KJ/Kg)
1	Aire	298	100	19.1362	424.2881	3.8838	0
2	Aire	830.1217	1950	19.1362	982.0931	4.1897	466.6276394
3	Gases	1425.32	1950	19.5000	1820.8337	7.2105	405.180001
4	Gases	818.15	100	19.5000	1010.4221	7.2578	-419.3308535

Nota: La tabla muestra las propiedades termodinámicas calculadas para cada uno de los estados del ciclo simple con los gases de combustión generados por el propano.

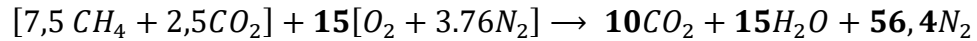
Figura 11.

Diagrama T - s de un ciclo Brayton simple con propano



Nota: La gráfica muestra la entropía generada en un ciclo simple utilizando propano.

3.2.1.b. Biogás. Balance de combustión para el Biogás:



$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = 8,9797 \frac{kg_{aire}}{kg_{comb}}$$

$$\lambda = 4.7548 \approx 5$$

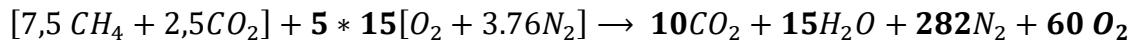


Tabla 14.

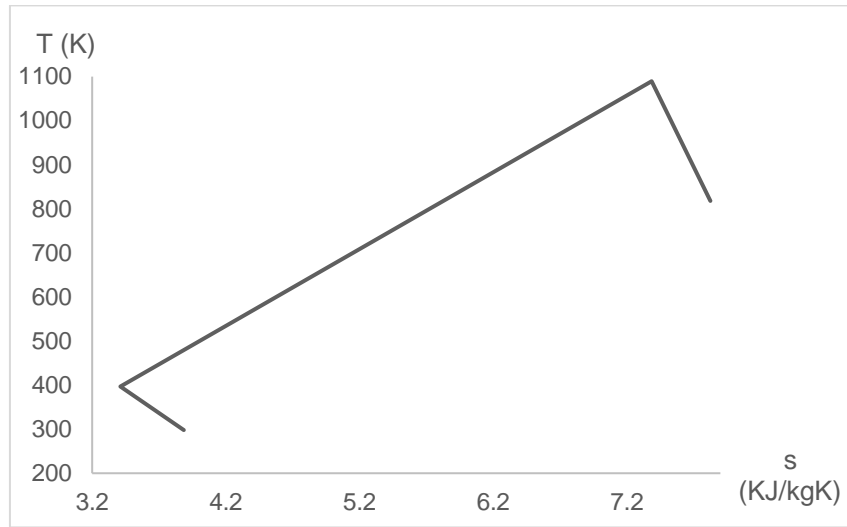
Estados Termodinámicos para el Biogás

Estado	Fluido	T (K)	P (KPa)	ṁ (Kg/s)	h (KJ/Kg)	s (KJ/Kg K)	ex - ψ (KJ/Kg)
1	Aire	298	100	19,05	424,2881	3,8838	0,0000
2	Aire	396,8743	1400	19,05	522,6083	3,4110	239,2141
3	Gases	1089,5048	1400	19,50	1367,7096	7,3874	-100,6589
4	Gases	818,15	100	19,50	938,6543	7,8252	-660,1676

Nota: La tabla muestra las propiedades termodinámicas calculadas para cada uno de los estados del ciclo simple, tomando los productos de la combustión de biogás.

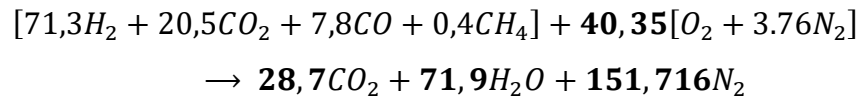
Figura 12.

Diagrama T - s de un ciclo Brayton simple con biogás.



Nota: La gráfica muestra la entropía generada en un ciclo simple utilizando biogás.

3.2.1.c. Gas de Síntesis



$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = 4,3783 \frac{kg_{aire}}{kg_{comb}}$$

$$\lambda = 14,4286 \approx 14,5$$

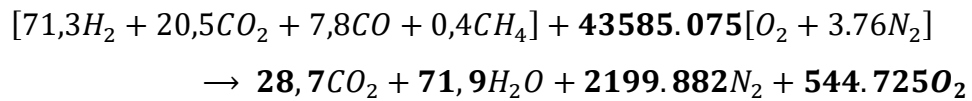


Tabla 15.

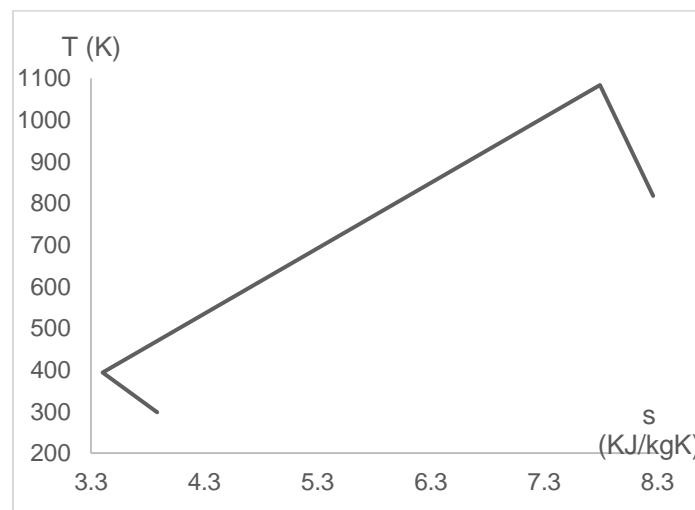
Estados Termodinámicos para el gas de síntesis.

Estado	Fluido	T (K)	P (KPa)	\dot{m} (Kg/s)	h (KJ/Kg)	s (KJ/Kg K)	ex - ψ (KJ/Kg)
1	Aire	298	100	18,5661	424,2881	3,8838	0,0000
2	Aire	393,8931	1400	18,5661	519,5548	3,4032	238,4620
3	Gases	1083,8356	1400	19,5000	1351,7322	7,7960	-238,3926
4	Gases	818,15	100	19,5000	965,1849	8,2646	-764,5979

Nota: Tabla con las propiedades calculadas para cada estado utilizando gas de síntesis como combustible.

Figura 13.

Diagrama T - s de un ciclo Brayton simple



Nota: La gráfica muestra la entropía generada en un ciclo simple utilizando gas de síntesis.

3.2.2. Resultados del análisis de combustión

Del anterior análisis de combustión se obtiene la siguiente información respecto a los gases obtenidos a la salida de la cámara de combustión.

Tabla 16.

Gases de combustión expulsados a la atmosfera.

Sustancia	Propano	Biogás	Gas de Síntesis
CO2	0.0561	0,0426	0,0165
H2O	0.0298	0,0262	0,0170
N2	0.7527	0,7650	0,8045
O2	0.1614	0,1859	0,2276

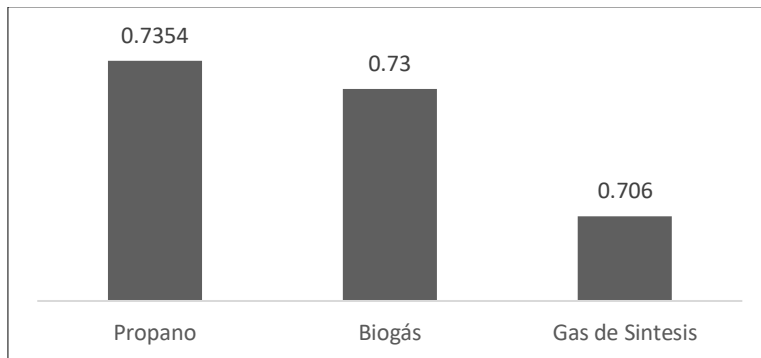
Nota: Tabla con la composición obtenida para los gases de combustión según el combustible utilizado.

El combustible con menor exceso de aire es el propano, directamente relacionado a su capacidad calorífica, sin embargo, es el que mayor cantidad de CO₂ genera.

De acuerdo con las propiedades de cada combustible es posible obtener un comparativo en la eficiencia politrópica.

Figura 14.

Eficiencia politrópica por combustibles



Nota: La figura representa la eficiencia politrópica óptima de acuerdo con cada combustible, considerando unos parámetros de entrada iguales en cada escenario.

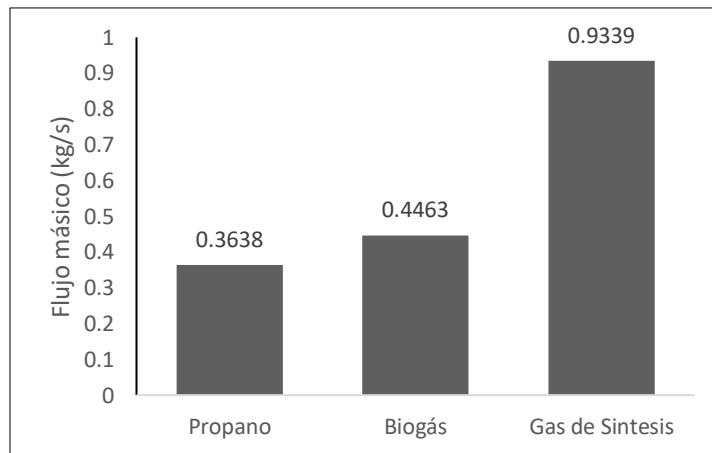
Con la anterior gráfica se obtiene que el combustible con mayor eficiencia politrópica es el propano, mientras que el gas de síntesis tiene una eficiencia menor al resto. Los

valores oscilan dentro de lo especificado en la literatura. El cambio se atribuye a relación de compresión con la cual se está trabajando. Cada combustible se comporta de una manera diferente por lo que al variar la relación de compresión en el caso del biogás y gas de síntesis se encontró que para obtener la misma eficiencia que al utilizar propano, la relación de compresión debe ser alrededor de 4:1.

Otro factor importante obtenido fue la cantidad de combustible que ingresa a las condiciones iniciales dadas.

Figura 15.

Flujo másico necesario por combustible.

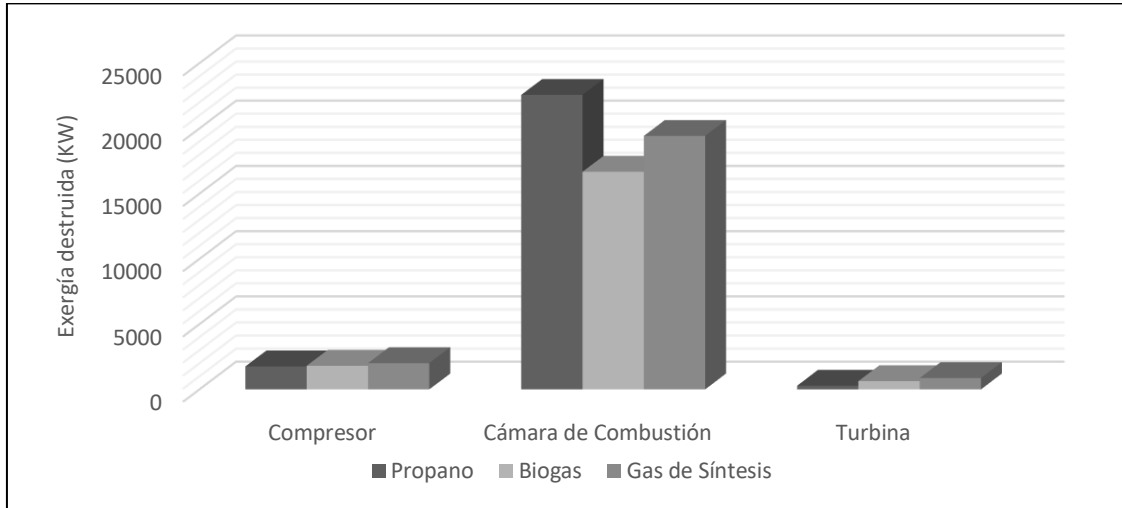


Nota: La figura muestra el combustible necesario para generar una misma potencia eléctrica de salida.

Con los resultados obtenidos se identifica que es necesario utilizar un 157% más de gas de síntesis y un 22.6% más de biogás en comparación con el propano, teniendo en cuenta que el calor generado debe ser el mismo. Esto es directamente proporcional a la capacidad calorífica de cada combustible. En la tabla 6 se muestra que el propano y el biogás tiene una diferencia del 18% mientras que, en comparación con el gas de síntesis, su poder calorífico es un 61% menos que el del propano.

Figura 16.

Exergía destruida por combustible



Nota: La figura detalla la exergía destruida por cada equipo de acuerdo con el combustible usado.

Cómo se evidenció en el balance preliminar, la mayor destrucción de exergía se presenta en la cámara de combustión, ya que allí es donde ocurre la reacción química que libera la energía necesaria para elevar la temperatura y presión de los gases. El propano presenta una mayor destrucción en la cámara de combustión que el resto de combustible, se asocia a una capacidad calorífica mayor, al liberar más energía, las pérdidas por irreversibilidades aumentan proporcionalmente. Por otro lado, el biogás es el que menores pérdidas en la reacción presenta, indicando que la energía del combustible es mucho más aprovechada, teniendo en cuenta la cantidad de combustible a la entrada y las pérdidas en la turbina, las cuales son mayores al propano pero que siguen significando una ganancia en comparación con las pérdidas totales producidas por el propano.

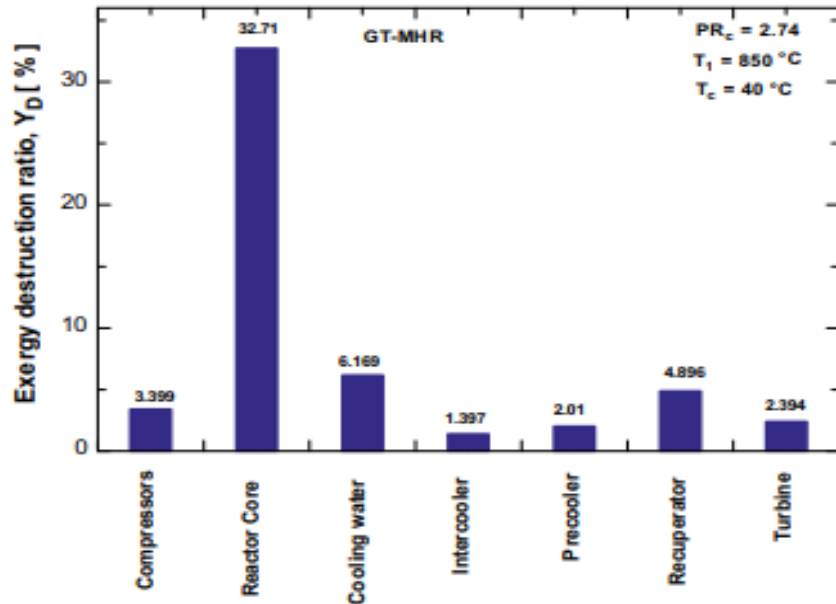
4. COMPARATIVO CON LITERATURA

El proceso de construcción del análisis inicial se basa en tomar las variables de acuerdo con la literatura. El primer factor por analizar es la eficiencia politrópica del compresor. Como se menciona en la literatura la eficiencia politrópica ideal se encuentra entre el 80% y 90%, valor asumido como 80.6% en el análisis inicial teniendo en cuenta que la eficiencia politrópica del compresor y de la turbina debe ser la misma, para acercarse al funcionamiento de una turbina real [22].

Por otro lado, la exergía destruida obtenida en el análisis figura 8 y 9 través del ciclo, muestra un comportamiento esperado al ser comparado con un reactor de helio modular de turbina de gas (GT-MHR). La diferencia entre los dos procesos consiste en que para el reactor utiliza helio como fluido de trabajo, pero que de igual manera pasa por los mismos equipos de un ciclo Brayton Simple [23].

Figura 17.

Tasa de destrucción de exergía en los componentes de las plantas GT-MHR y GT-MHR / ORC en comparación con la exergía de entrada.



Nota: Exergía destruida en un ciclo combinado. Tomado de: Yari, M. and S. M. S. Mahmoudi, 2010). "Utilization of waste heat from GT-MHR for power generation in organic Rankine cycles." Appl. Therm. Eng. Available:

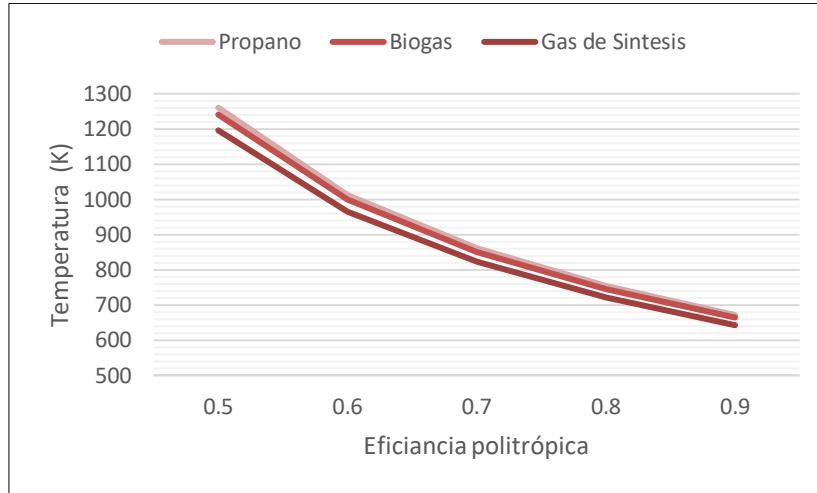
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S13594311090029>

19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.017>.

Dentro del proceso de análisis del ciclo se encontraron relaciones proporcionales dependientes de la eficiencia politrópica, en este caso para la temperatura de salida. Si bien al inicio del ejercicio la temperatura de salida nos permite realizar el balance de la turbina y/o regenerador, esta también va a variar a medida que la eficiencia politrópica. Por lo cual, demostramos que para los análisis de combustión es necesario utilizar un valor único para evaluar correctamente las pérdidas.

Figura 18.

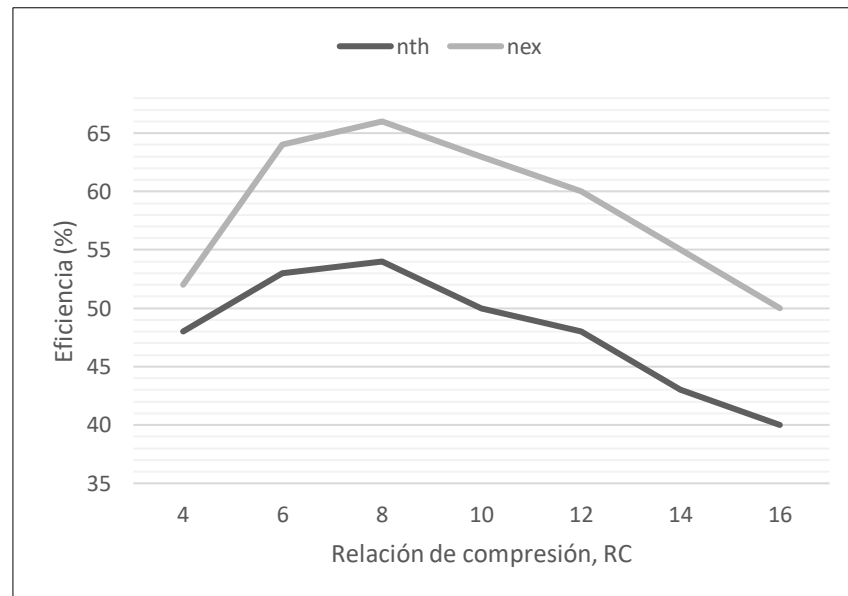
Temperatura de salida en función de la eficiencia politrópica



Nota: Gráfica de las temperaturas de salida en función a la variación de la eficiencia politrópica.

Figura 19.

Eficiencia térmica y exergética en función de radio de

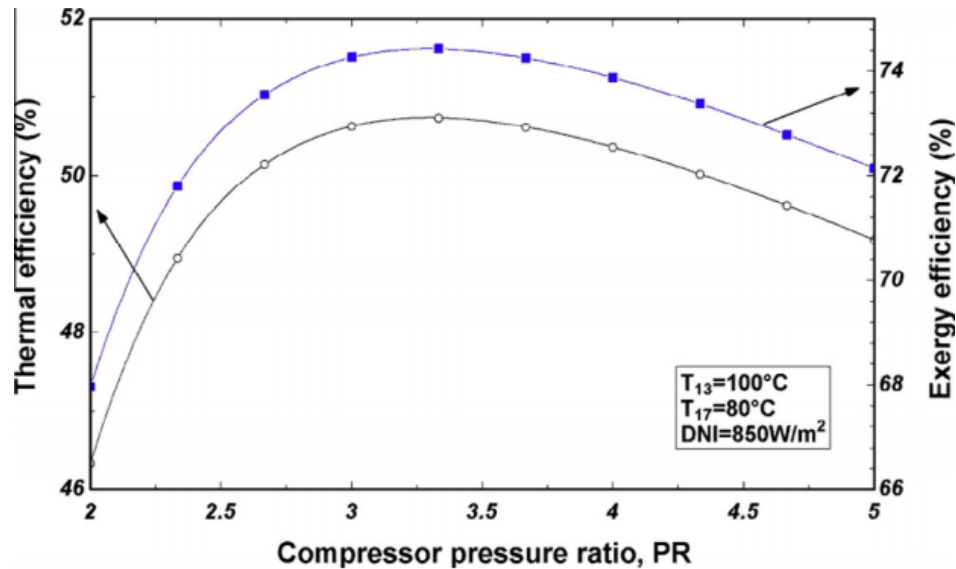


Nota: La gráfica muestra la tendencia en relación con la RC de la turbina y las eficiencias energéticas y exergéticas obtenidas.

A medida que se incrementa la relación de compresión se puede observar un aumento en la eficiencia térmica y en la eficiencia exergética, sin embargo al superar al llegar a su pico (RC = 8) esto sucede porque a partir de este punto la relación de potencia neta con el respecto al calor de entrada empieza a disminuir porque en este caso se evalúa con un valor de 73% para la eficiencia politrópica, ya que como se evidencio anteriormente este es el valor ideal cuando se utiliza el propano como combustible (figura 14). Este comportamiento se espera que tienda a la derecha en medida que la eficiencia politrópica aumente

Figura 20.

Efectos del RC en la eficiencia del ciclo



Nota: Comportamiento de un ciclo combinado de las eficiencias energéticas y exergéticas en función de la relación de compresión. Tomado de: Zare, V. and M. Hasanzadeh, 2016). "Energy and exergy analysis of a closed Brayton cycle-based combined cycle for solar power tower plants." Energy Conversion and Management.

Available:

<http://ezproxy.uamerica.edu.co:2103/science/article/pii/S0196890416308792>.

DOI: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2104/10.1016/j.enconman.2016.09.080>

5. ANÁLISIS TERMOECONÓMICO

Con ayuda de los balances termodinámicos y específicamente desde la exergía se tiene una base para la evaluación de combustibles, eficiencias de equipos, sistemas y sus costos. Principalmente porque permite comparar la eficiencia en la conversión de diferentes tipos de energía, en este caso desde calor al trabajo. La termoeconomía busca aplicar los principios económicos a los procesos para cumplir su fin funcional a un mínimo costo y con las menores pérdidas. Los análisis termodinámicos establecen tanto guías como limitaciones en la posibilidad de procesos y opciones de medidas a tomar para la mejora del ciclo. [5]

La exergía destruida se relaciona las pérdidas por irreversibilidades en cada equipo y ciclo. De acuerdo con el análisis realizado en el Capítulo 2. Se obtienen los valores de exergía destruida para cada equipo. Los valores se basan en el modelo previamente estable para una relación de presión única (14) y para una eficiencia politrópica constante (73%).

Tabla 17.

Perdidas por equipo mensuales.

	Perdidas (MWh)		
	Combustible		
	Propano	Biogás	Gas de síntesis
Compresor	1268.5070	1304.1025	1448.2767
Cámara de Combustión	16250.3061	12008.0774	13985.5837
Turbina	202.1644	453.6577	624.9519

Nota: Valores de exergía destruida por equipo en MWh

Para hallar las pérdidas totales se realiza la suma de la exergía perdida en cada equipo para luego multiplicarse por las horas de servicio del equipo. Ya que la finalidad del equipo es producir potencia, se toma una operación 24/7 a lo largo del mes así que esta conversión se aplica a los valores obtenidos de la figura 19.

$$\text{Exergía destruida del ciclo} = \text{Exergía destruída por combustible} \times 30 \text{ días} \times 24 \text{ Horas}$$

El costo promedio del propano es de \$730.85/kg [25] y por cada kilogramo de propano utilizado se generan 13.385KWh. Al aplicar una regla de tres se obtiene el valor económico de las pérdidas para el propano.

$$\text{Costo Exd} = \frac{\text{Precio combustible}}{\text{KWh generados}} * \text{Exdes Ciclo} * \text{FC}$$

Donde, el costo total de las perdidas equivale a relación entre el precio por cada KWh generado y la exergía destruida del ciclo. FC es el factor de corrección que se aplica para los combustible biogás y gas de síntesis.

El biogás y el gas de síntesis son combustibles que poco a poco han tomado fuerza a nivel investigativo y aplicaciones pequeñas, como plantas rurales. Sin embargo, al no ser producidos a una gran escala, no existe un desglose del proceso de producción con sus respectivos costos, por lo que, para efectos prácticos se tomó la relación FC entre los poderes caloríficos de ambos combustibles respecto al gas propano.

Tabla 18.

FC respecto al propano.

Combustible	FC
Biogas	0.8151
Gas de síntesis	0.3895

Nota: Relación del poder calorífico respecto al propano

Los costos por pérdidas totales en el equipo con el servicio considerado se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19.

Costo de pérdidas totales por mes

Costo de perdidas por irreversibilidades (COP)			
	Combustible		
	Propano	Biogás	Gas de síntesis
Compresor	\$ 69,263	\$ 71,207	\$ 79,079
Cámara de Combustión	\$ 887,302	\$ 655,667	\$ 763,643
Turbina	\$ 11,039	\$ 24,771	\$ 34,124
Total	\$ 967,604	\$ 751,645	\$ 876,846

Nota: La tabla muestra los resultados de las pérdidas por exergía destruida en cada equipo y por cada combustible.

6. UTILIDAD E IMPACTO

El gas de síntesis y el biogás son los biocombustibles típicamente generados por desechos de biomasa. En este trabajo se realizó una comparación respecto al combustible tradicional, propano. De los resultados se obtiene que es posible reducir las emisiones de dióxido de carbono hasta en un 80% para el gas de síntesis y en un 25% para el biogás, el cual es uno de los principales gases de efecto invernadero. Dicho análisis de combustión no considera las emisiones generadas de NOx, sin embargo, respecto a estudios similares se puede observar que dichas emisiones disminuyen al utilizar biogás. [26]

En cuanto al gas de síntesis se encontró que su impacto en la generación de emisiones NOx es mínimo, y puede considerarse virtualmente insignificante [26].

Los biocombustibles son las puertas a toda una nueva industria de energía enfocada a la conservación y preservación de los recursos naturales. Si bien toda acción humana representa un impacto ambiental, es posible disminuirlo al utilizar los desechos de otras actividades, en este caso agrícolas. Una gran ventaja que ofrecen, principalmente el biogás, es la facilidad de producción ya que permite a poblaciones rurales, con difícil acceso a los combustibles tradicionales, obtener un beneficio a nivel personal, en su día a día, social y económico.

A nivel de producción, los biocombustibles han ido incrementando en los últimos años y, específicamente en Colombia, se han iniciado pequeños proyectos con el fin de aprovechar los desechos, un ejemplo de ello es el relleno sanitario Doña Juana, que cuenta con una planta de quema de metano y producción de energía eléctrica. Allí se procesan cerca de 6.700 toneladas de residuos sólidos.

Por medio del análisis realizado es posible aplicarlo a dicha planta para poder identificar eficiencias, pérdidas y potencias máximas, con el fin no solo de ahorrar en términos energéticos y económicos, si no de proyectar e incrementar la producción de combustible.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un modelo termodinámico aplicando la Primera y Segunda de Ley de la Termodinámica para cada componente del sistema, con el fin de obtener los balances de masa y energía para identificar las pérdidas durante un ciclo Brayton simple y un ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración. La base del modelo se toma de acuerdo con las especificaciones de turbinas reales lo que significa que puede ser aplicado a distintos modelos comerciales.

Por medio del análisis termodinámico se puede concluir que la mayor cantidad de pérdidas se presentan en la cámara de combustión, representando el 80% de las pérdidas totales en el ciclo. Lo que significa que para el proceso de optimización es importante enfocarse en este equipo.

A partir del análisis de combustión realizado en proyecto se proponen el propano y el biogás como los combustibles más viables. Debido a su poder calorífico similar, la cantidad necesaria es tan solo un 22% más en el caso del biogás respecto al propano, que se puede contrarrestar con las pérdidas exergéticas, siendo este último que menores pérdidas presenta. También se tiene en cuenta que las emisiones de CO₂ son un 75% menores a las generadas por el propano.

Las condiciones y parámetros que se establecieron para realizar la comparativa económica son suficientes para concluir que el costo de las pérdidas es mayor para el propano con un valor de \$ 967,604 mensuales, seguido del Gas de Síntesis con \$ 876,846 y por último el biogás \$ 751,645.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Mendoza. "Energía, Medio Ambiente y Economía" [Diapositivas]. p8 y 9. Email personal (Septiembre 14, 2018)
- [2] Y. Cengel y B, Michael. (2011) Ciclos de potencia de gas. Termodinámica. 7ma ed. México: McGRAW-HILL,
- [3] Y. Cengel. (2017). En: Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. 5 ed. Nueva York: Mc Graw Hill,. 491 p.
- [4] Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG 2020 [Sitio web]. 2020. Disponible en: <https://new.siemens.com/global/en/>
- [5] Y. Cengel. (2017). Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. 5ed. Nueva York: Mc Graw Hill, 491p.
- [6] M, Sa eid et al. (2015). Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. 3rd Edition. Gulf Professional Publishing, p 63.
- [7] Rosen, M. A. and I. Dincer, (2001). "Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development." Exergy, an International Journal. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1164023501000048>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1164-0235\(01\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S1164-0235(01)00004-8).
- [8] M. Roger. (1996). Organic Chemistry Volume 2 [En línea], University Science Books. DOI: 10.1021/ed037pA562
- [9] R., Jameel. (2016). "Climate Change: Causes, Effects, and Solutions". A with Honors Projects. 164. Available: <https://spark.parkland.edu/ah/164>

- [10] A, Edwin. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. Revista Científica de FAREM-Estelí. 60. 10.5377/farem.v0i24.5552.
- [11] F, Eileen. Experiencia en la obtención de biogás. Agencia cubana de noticias. Disponible en Internet: <http://www.acn.cu/images/2018/Junio/0619-produccion-de-biogas.png>
- [12] Estrada, c., & Meneses, a. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. Scientia Et Technica, 2(25). <https://doi.org/10.22517/23447214.7229>
- [13] Producción de gas de síntesis (2016) Disponible en línea: <https://combustibles-alternativos.weebly.com/gas-de-sintesis.html>
- [14] Rednova, "Ficha técnica y hoja de datos de seguridad del glp", 2018. Disponible en: <https://rednova.com.co/wp-content/uploads/2018/11/F0175-Ficha-tecnica-y-hoja-de-datos-de-seguridad-del-GLP.pdf>
- [15] I. Dincer and M. A. Rosen, "Chapter 5 - Cogeneration, Multigeneration, and Integrated Energy Systems," Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning, pp. 169-219, 2015. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124172036000053>. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417203-6.00005-3>.
- [16] Bell, I. H., Quoilin, S., Wronski, J., & Lemort, V. CoolProp: An open-source reference-quality thermophysical property library. Abstract from ASME ORC 2nd International Seminar on ORC Power Systems, Rotterdam, Netherlands. (2013).

- [17] P.Guyer., (2017). An Introduction to Steam Turbine Design, 2 edition, Guyer Partners
 Disponible:https://books.google.com.co/books/about/An_Introduction_to_Steam_Turbine_Design.html?id=rIFDDwAAQBAJ&redir_esc=y
- [18] Mendoza, L "Ciclos de potencia a gas" [Diapositivas] p 6. Email personal (Julio 6, 2019)
- [19]] Mendoza, L. "Taller Ciclo Brayton" [Archivo PDF], p 6. Email personal (Junio 15, 2019)
- [20] Zare,V. and M. Hasanzadeh, (2016)."Energy and exergy analysis of a closed Brayton cycle-based combined cycle for solar power tower plants." Energy Conversion and Management. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416308792>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.080>.
- [21] Gupta,K. K., A. Rehman and R. M. Sarviya, (2010)."Bio-fuels for the gas turbine: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002054>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.025>.
- [22] M, Michael J. (2008). Fundamentals of engineering thermodynamics. Hoboken, N.J.:Wiley,[En línea] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/44342201_Fundamentals_of_engineering_thermodynamics
- [23] Yari,M. and S. M. S. Mahmoudi, 2010)."Utilization of waste heat from GT-MHR for power generation in organic Rankine cycles." Appl. Therm. Eng. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431109002919>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.017>.

- [24] Zare, V. and M. Hasanzadeh, (2016). "Energy and exergy analysis of a closed Brayton cycle-based combined cycle for solar power tower plants." *Energy Conversion and Management*. Disponible: <http://ezproxy.uamerica.edu.co:2103/science/article/pii/S0196890416308792>. DOI: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2104/10.1016/j.enconman.2016.09.080>.
- [25] PropanoGas by Selectra. (2020) " Precio del gas propano en 2021: depósitos y bombonas por kg y kWh" [Internet] Disponible en: <https://propanogas.com/faq/precios-propano>
- [26] Kan X., Zhou D. et al. 2018. "An investigation on utilization of biogas and syngas produced from biomass waste in premixed spark ignition engine". *Applied Energy*, Volume 212, 2018, Pages 210-222, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.037>.