

	<b>GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS</b>	<b>CÓDIGO</b>	FO-GS-15
	<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>	<b>VERSIÓN</b>	02
<b>FECHA</b>		03/04/2017	
<b>PÁGINA</b>		1 de 1	
<b>ELABORÓ</b>	<b>REVISÓ</b>	<b>APROBÓ</b>	
Jefe División de Biblioteca	Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): JHON JAIRO APELLIDOS: ANGARITA CACERES

NOMBRE(S): JOHAN SEBASTIAN APELLIDOS: ZUÑIGA ALVAREZ

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): ORLANDO APELLIDOS: GUTIERREZ LOPEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DE UN CICLO JOULE DE DOS EJES CON BASE EN LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA

### RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal el análisis de la variación de algunas propiedades termodinámicas del Ciclo Joule de dos ejes, siendo está una de las configuraciones en las que trabajan las turbinas a gas; para ello, se inició con la selección de las propiedades a analizar las cuales fueron principalmente temperatura y presión.

En el desarrollo del trabajo se plantearon dos casos de estudio con la finalidad de comparar los resultados, para esto se estableció una base teórica con la cual se construyó un modelo número con la finalidad de conocer el comportamiento de las propiedades en relación a la potencia, consumo específico de combustible y eficiencia, dicho modelo se procesó por medio del software de MATLAB el cual permitió manejar una serie de ecuaciones complejas para obtener resultados más cercanos a la realidad y generar las gráficas necesarias para el análisis correspondiente.

Se concluyó que el primer caso estudiado dónde se mantenían trabajando las cámaras de combustión a la misma temperatura es el más indicado para el funcionamiento de este ciclo ya que se obtuvieron mejores resultados en los parámetros analizados, con este proyecto se abren líneas de investigación para futuros trabajos relacionados con el tema.

PALABRAS CLAVES: Turbina, Ciclo Joule, Energía, Potencia, Eficiencia

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 91      TABLAS: 17      FIGURAS: 9      CD ROOM: 1

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DE UN CICLO  
JOULE DE DOS EJES CON BASE EN LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA

JHON JAIRO ANGARITA CACERES

JOHAN SEBASTIAN ZUÑIGA ALVAREZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER

2022

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DE UN CICLO  
JOULE DE DOS EJES CON BASE EN LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA

JHON JAIRO ANGARITA CACERES

JOHAN SEBASTIAN ZUÑIGA ALVAREZ

DIRECTOR:

ORLANDO GUTIERREZ LOPEZ

INGENIERO MECÁNICO – UNAL

MASTER OF ENGINEERING-MECHANICAL, USA

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTAR AL TITULO  
DE INGENIERÍA MECÁNICA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER

2022

# ACTA DE SUSTENTACIÓN



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

**FECHA:** CÚCUTA, 19 DE ABRIL 2023  
**HORA:** 09:00 A.m.  
**LUGAR:** FU-306  
**PLAN DE ESTUDIOS:** INGENIERÍA MECÁNICA

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DE UN CICLO JOULE DE DOS EJES CON BASE EN LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA.

**Jurados:** ING. LUIS EMILIO VERA DUARTE  
ING. ALBERTO FALLA ARIAS

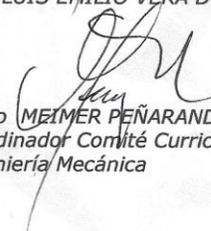
**Director:** ING. ORLANDO GUTIÉRREZ LÓPEZ

Nombre de los estudiantes	Código	Calificación	
		Letra	Número
JHON JAIRO ANGARITA CÁCERES	1121721	Cuatro, seis	4.6
JOHAN SEBASTIAN ZUÑIGA ALVAREZ	1121710	Cuatro, seis	4.6

## MERITORIA

  
ING. LUIS EMILIO VERA DUARTE.

  
ING. ALBERTO FALLA ARIAS.

  
Vo.Bo MEIMER PEÑARANDA CARRILLO  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Mecánica

## **Dedicatoria**

A mi abuela Matilde Santos quien fue la principal autora de mi formación personal y quién hoy se encuentra celebrando este triunfo conmigo desde el cielo. A mi madre María Margarita Cáceres por ser el pilar más importante en mi vida, quien me acompañó y me ayudó durante mi formación académica. A Daniela Torres por el apoyo brindado durante todo el proceso de formación como Ingeniero Mecánico.

*Jhon Jairo Angarita Cáceres*

## **Dedicatoria**

Este trabajo de grado es dedicado a mi Madre, Martha Cecilia Álvarez Vergel, quien con su amor, paciencia y esfuerzo me permitió llegar a cumplir hoy un sueño más, también a mi padre, Orlando Zúñiga Castillo quién hoy se encuentra celebrando este triunfo conmigo desde el cielo, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, haciéndome un gran hombre para el día de hoy y verme convertido en un gran profesional, un Ingeniero Mecánico.

Finalmente quiero dedicarle este trabajo de grado a toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento que hicieron de mí ser una mejor persona y de una u otra forma me han acompañado en mis sueños y metas.

*Johan Sebastián Zúñiga Álvarez*

## **Agradecimientos**

Primeramente dar gracias a Dios por permitirnos lograr culminar nuestra carrera de ingeniería mecánica. Por otra parte queremos agradecer a nuestros padres y familiares que estuvieron siempre apoyándonos moralmente y económicamente.

A la universidad Francisco de Paula Santander por ser nuestra casa de estudios y permitirnos ser profesionales, a todos los docentes que con sus conocimientos contribuyeron a nuestra formación en especial al ingeniero Orlando Gutiérrez López por su gran apoyo para finalizar nuestro proyecto de grado.

Finalmente queremos agradecer a nuestros compañeros y amigos con los que compartimos durante estos años de formación profesional, apoyándonos cuando era necesario, y por extender su mano en momentos difíciles.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción	14
1. Título	16
1.1. Planteamiento del Problema	16
1.2. Formulación del Problema	17
1.3. Justificación	17
1.4. Objetivos	18
1.4.1. Objetivo General	18
1.4.2. Objetivos Específicos	18
1.5. Alcances y Delimitaciones	19
1.5.1. Alcances	19
1.5.2. Limitación y Delimitaciones	19
2. Marco Referencial	21
2.1. Antecedentes	21
2.2. Marco Teórico	28
2.2.1. Teoría del Ciclo Joule Brayton	28
2.2.1.1. Descripción del Ciclo Joule Brayton.	29
2.2.2. Teoría de las Turbinas a Gas	31
2.2.2.1. Ventajas y Desventajas de la Turbina a Gas.	32
2.2.3. Turbina a Gas de Dos Ejes	33
2.3. Marco Conceptual	35
2.4. Fundamentos Legales	37

3.	Diseño Metodológico	39
3.1.	Enfoque de la Investigación	39
3.2.	Tipo de Investigación	40
3.3.	Fuentes de Información	40
3.3.1.	Fuentes de Información Primaria	40
3.3.2.	Fuentes de Información Secundaria	41
3.4.	Técnicas Para Interpretación y Análisis de Datos	41
4.	Modelo Numérico	42
4.1.	Modelo Numérico Para un Ciclo Joule de Dos Ejes con Turbina Libre	42
4.2.	Nomenclatura	43
5.	Análisis de Resultados	51
5.1.	Datos de Entrada del Ciclo Joule de Dos Ejes	51
5.2.	Caso 1. Variación de la Temperatura Máxima en la Cámara de Combustión Principal	52
5.3.	Caso 2. Variación de la Temperatura Máxima en la Cámara de Combustión Secundaria	60
6.	Conclusiones y Recomendaciones	69
7.	Referencias Bibliográficas	71
	Anexos	77

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Datos de entrada del ciclo joule de dos ejes.	51
Tabla 2. Resultados para temperatura máxima de 1200 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	52
Tabla 3. Resultados para temperatura máxima de 1200 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	53
Tabla 4. Resultados para temperatura máxima de 1300 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	53
Tabla 5. Resultados para temperatura máxima de 1300 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	54
Tabla 6. Resultados para temperatura máxima de 1400 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	54
Tabla 7. Resultados para temperatura máxima de 1400 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	55
Tabla 8. Resultados para temperatura máxima de 1500 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	55
Tabla 9. Resultados para temperatura máxima de 1500 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	56
Tabla 10. Resultados para temperatura máxima de 1300 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	61
Tabla 11. Resultados para temperatura máxima de 1300 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	61

Tabla 12. Resultados para temperatura máxima de 1400 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	62
Tabla 13. Resultados para temperatura máxima de 1400 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	62
Tabla 14. Resultados para temperatura máxima de 1500 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	63
Tabla 15. Resultados para temperatura máxima de 1500 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	63
Tabla 16. Resultados para temperatura máxima de 1600 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	64
Tabla 17. Resultados para temperatura máxima de 1600 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.	64

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama del ciclo Brayton.	31
Figura 2. Diagrama esquemático de una turbina de gas de dos ejes.	35
Figura 3. Diagrama del ciclo joule de dos ejes con turbina libre.	42
Figura 4. Potencia Vs relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de principal.	57
Figura 5. Consumo específico de combustible VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de principal.	58
Figura 6. Eficiencia VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de principal.	59
Figura 7. Potencia VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de combustión secundaria.	65
Figura 8. Consumo específico de combustible VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de combustión secundaria.	66
Figura 9. Eficiencia VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de combustión secundaria.	67

## Lista de anexos

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.	78
Anexo B. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.	79
Anexo C. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.	80
Anexo D. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.	81
Anexo E. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.	82
Anexo F. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.	83
Anexo G. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.	84
Anexo H. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.	85
Anexo I. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.	86
Anexo J. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.	87
Anexo K. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.	88
Anexo L. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.	89
Anexo M. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.	90
Anexo N. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.	91

## **Introducción**

El presente proyecto tiene como objetivo principal el análisis de los efectos causados por la variación de propiedades termodinámicas como lo son la presión y temperatura en un ciclo Joule de dos ejes, es importante iniciar por decir que el ciclo Joule es un ciclo termodinámico generador de potencia, Jones y Dugan (1997) definen el funcionamiento del ciclo de la siguiente manera “El aire en condiciones ambientales se introduce en un compresor axial o centrífugo donde su temperatura y presión se eleva. El aire de alta presión sigue hacia la cámara de combustión donde el combustible se quema a presión constante y los gases de alta temperatura que resultan entran a la turbina en donde se expanden hasta la presión atmosférica, de manera tal que produce potencia. Los gases de escape que salen de la turbina se expulsan hacia fuera”. Partiendo de esta idea se puede decir que un ciclo Joule de dos ejes es aquel arreglo donde se tiene un ciclo Joule básico cuyo funcionamiento es el anteriormente descrito con la diferencia de que se adiciona otra turbina la cual estará conectada al compresor y adicionalmente se dispone una cámara de combustión en medio de estos dos, esta última turbina adicionada generará la potencia mientras que la del ciclo básico será la encargada de producir el movimiento del compresor, cabe resaltar que el ciclo Joule es usado en la producción de energía que se hace por medio de combustión.

En el marco de la crisis energética por la cual está atravesando el mundo, crece la necesidad de investigar alternativas para la producción de energía, como es el propósito de este proyecto, que nace del interés de aportar conocimiento al tema inicialmente nombrado del cual no se tienen muchos estudios a nivel mundial, es por esto que se requiere indagar y crear bases teóricas para futuras investigaciones.

La finalidad de este estudio es analizar los efectos causados por la variación de ciertas propiedades termodinámicas en el ciclo Joule de dos ejes; para esto se estudiarán propiedades como temperatura y presión por medio de la construcción de un modelo numérico con base en recursos bibliográficos y a su vez empleando el software MATLAB, con el fin de analizar los cambios con ayuda de esquemas o gráficas, de esta forma poder determinar si este nuevo arreglo del ciclo joule es eficiente y se ajusta a las exigencias de la industria.

## 1. Título

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DE UN CICLO JOULE DE DOS EJES CON BASE EN LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA.

### 1.1. Planteamiento del Problema

En la actualidad la demanda de energía ha aumentado debido a la sobrepoblación e industrialización por lo cual se vuelve una necesidad economizar dicho consumo; algunas plantas de producción de energía trabajan bajo los parámetros de un ciclo Joule preestablecido limitando implementar nuevas alternativas, es por esto que estos estudios toman relevancia en la búsqueda de una solución.

Por consiguiente, se hace necesario estudiar nuevas configuraciones que permitan mejorar la eficiencia del ciclo, existe un amplio déficit de investigaciones sobre dichos arreglos, por lo cual se vuelve un problema la experimentación de otras opciones de funcionamiento siendo requerido que se realicen estudios que aporten al conocimiento sobre este tema.

Al no contarse con un modelo numérico establecido se requiere la formulación de uno partiendo de modelos matemáticos generales sobre los cuales se rige el ciclo y de esta forma poder realizar los cálculos necesarios para el análisis deseado en el desarrollo de este proyecto.

Cabe mencionar que se conoce la configuración de dos ejes para el ciclo Joule, pero no se ha estudiado a fondo, en el caso de este proyecto se busca variar algunas de las propiedades termodinámicas del mismo, es decir, cambiar los factores y observar los efectos que estos causan en el ciclo partiendo del planteamiento de nuevos fundamentos teóricos, permitiendo conocer así

si dicha configuración podría ser eficiente y por tanto rentable. Es de suma relevancia abrir líneas de investigación sobre estos temas que contribuyen a soluciones próximas a los problemas de energía que se presentan alrededor del mundo.

## **1.2. Formulación del Problema**

¿Cuáles son los resultados del estudio de la variación de la temperatura y presión de un ciclo joule de dos ejes con base en la potencia y la eficiencia?

## **1.3. Justificación**

Para iniciar, cabe recordar que los seres humanos siempre han buscado la producción de energía, de una u otra forma esta ha hecho parte del desarrollo industrial de la sociedad, ha sido tanta su importancia que los seres humanos encontraron la forma de transformar la energía mecánica en energía eléctrica y es aquí donde nace el interés por los ciclos termodinámicos los cuales hacen parte de los procesos de producción de energía.

El mundo está en constante evolución y la necesidad de estudiar técnicas innovadoras que le permitan al ser humano conocer nuevas opciones que ofrezcan rentabilidad, se ha vuelto un desafío para los investigadores de esta época. En la industria, la incertidumbre sobre estudios alternativos de producción de energía que den soluciones próximas a la crisis energética mundial ha aumentado en gran proporción, esto se ve reflejado en los estudios sobre el uso de energías renovables y en la actualización de los métodos ya existentes para su mejor aprovechamiento, por lo cual es importante investigar y analizar otras opciones en cuanto a los estudios de los

ciclos que operan las plantas de producción de energía para lograr mayor eficiencia y por ende rentabilidad.

El objetivo de este proyecto es poder observar y analizar los efectos que ocasiona la variabilidad de algunas propiedades termodinámicas tales como la presión y la temperatura de un ciclo Joule de dos ejes partiendo de construir una base teórica que permita realizar los cálculos necesarios para llegar a dicho objetivo y de allí poder concluir si los resultados obtenidos son favorables o por el contrario no es oportuno la implementación de este.

Finalmente, es importante resaltar que no se han realizado muchas investigaciones en Latinoamérica en lo que respecta a este tema, es por esto, que aparte de conocer una nueva opción que tal vez puede llegar a ser más eficiente no solo aportaría al desarrollo de la humanidad, sino que sería un gran aporte al conocimiento sobre este tema a nivel mundial.

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo General***

Elaborar el estudio de la variación de la temperatura y presión de un ciclo joule de dos ejes con base en la potencia y la eficiencia.

### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Caracterizar el ciclo joule de dos ejes.
- Analizar las variaciones de la temperatura y presión en el ciclo Joule de dos ejes
- Aplicar el instrumento tecnológico; software de MATLAB
- Registrar la información resultante del software de MATLAB

- Evaluar los resultados obtenidos con base en la eficiencia y potencia en el ciclo Joule de dos ejes.

## **1.5. Alcances y Delimitaciones**

### ***1.5.1. Alcances***

- El presente estudio explorara nuevas alternativas sobre las configuraciones del ciclo Joule que podrían ser eficientes para las plantas de producción de energía que trabajen con este ciclo.
- Aportar nuevo conocimiento sobre la configuración de dos ejes de un ciclo Joule para futuras investigaciones que puedan tomar como referencia este estudio.
- Se espera obtener parámetros que permitan conocer el comportamiento del ciclo y a partir del análisis de estos saber si es factible si implementación.

### ***1.5.2. Limitación y Delimitaciones***

- Al tratarse de un tema con pocos fundamentos teóricos no se cuenta con la información necesaria para construir una base teórica amplia.
- No existe un modelo numérico preestablecido.
- Al implementar el software este no genere los resultados esperados con respecto al modelo numérico.

- Teniendo en cuenta que este es un campo de investigación muy extenso se abarcara solo la variación de ciertas propiedades en específico que dan una idea del comportamiento del ciclo joule de dos ejes.

## 2. Marco Referencial

A partir del tema de investigación, se han realizado referencias e investigaciones relacionadas con las variaciones de las propiedades térmicas de un ciclo Joule de dos ejes. Dado que los antecedentes son importantes ya que son la base fundamental para construir una investigación sólida, también cumplen el papel de demostrar a las personas los estudios que se han realizado referentes a la investigación. Según Fideas Arias (2004), “Los antecedentes reflejan el progreso y el estado actual del conocimiento en un campo determinado, y sirven como modelos o ejemplos para futuras investigaciones” (pág. 108)

### 2.1. Antecedentes

Thamir K Ibrahim y M M Rahman (2012) *Estudio paramétrico de un modelo de ciclo de turbina de gas de dos ejes de una central eléctrica* IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng. 36.

Publicado en Malaysia

En este trabajo se propone el estudio paramétrico de un modelo de ciclo de turbina de gas de dos ejes de la central eléctrica. Se evalúan la potencia, el trabajo de compresión, el consumo específico de combustible y la eficiencia térmica con respecto a la temperatura del ciclo y la relación de compresión para un conjunto típico de condiciones de funcionamiento. Se modela un ciclo de turbina de gas de dos ejes con parámetros realistas. El modelo computacional se desarrolló utilizando los códigos de MATLAB. Se encontró que el trabajo de la turbina disminuye a medida que aumenta la temperatura ambiente, así como la eficiencia térmica. Se puede ver que la eficiencia térmica y la potencia de salida aumentan linealmente con el aumento de la relación de compresión, mientras que disminuye la temperatura ambiente. La potencia de la

turbina de gas de dos ejes simulada alcanza los 135MW, que es superior a la del ciclo de turbina de gas simple (central de turbina de gas de Baiji, potencia < 131MW). El consumo específico de combustible aumenta con el incremento de la temperatura ambiente, así como con la disminución de la temperatura de entrada de la turbina. A pesar de que la temperatura de entrada de la turbina es más baja, el rendimiento térmico disminuye drásticamente y la potencia aumenta linealmente con el aumento de la relación de compresión y la disminución de la temperatura ambiente.

La metodología de esta investigación es muy similar a la que se desea emplear para el desarrollo del proyecto, por tanto, es una base teórica clara que servirá como referencia para construir el modelo numérico del cual partirá el desarrollo de la presente investigación; a su vez, permitirá realizar una comparativa en cuanto a los resultados obtenidos con respecto a los esperados en este estudio.

Robert Poku (2014). *Evaluación del rendimiento termodinámico de una central eléctrica de turbina de gas de dos ejes*. Revista internacional de investigación y tecnología de ingeniería (IJERT), Departamento de Ingeniería Mecánica/Marina, Universidad del Delta del Níger, Nigeria.

En este trabajo se evaluó el desempeño de una central de Turbina a Gas de dos ejes con base en las eficiencias de la planta desde el año 2002 al 2007. Los parámetros utilizados en la evaluación son las condiciones ambientales, las eficiencias térmicas en la entrada y salida. Temperaturas de la turbina de potencia. Los resultados mostraron que la mayor eficiencia térmica de la turbina se obtuvo en el año 2006 cuando la temperatura promedio de entrada del

compresor de la turbina y la temperatura de salida (escape) de la turbina de potencia son las menores. Con el aumento de la eficiencia térmica del 42,62 %, el aumento del valor de la relación de presión del compresor de 7,78 y la temperatura mínima de entrada del compresor de 25,080C.

La investigación muestra que las plantas de turbinas de gas funcionan mejor en las regiones templadas que en las tropicales. Por lo tanto, para aumentar la eficiencia de las plantas de turbinas de gas existentes en climas de alta temperatura, es necesario adaptar un enfriador de aire que siempre reduzca la temperatura o se acerque a la temperatura de diseño antes de que sea necesaria la compresión.

Al ser un proyecto practico sobre el cual se realizó un estudio en un determinado tiempo ofrece la posibilidad de tener una idea de los efectos esperados por las variaciones de temperatura ya sea a la entrada del compresor como las de escape, puesto que allí evalúan bajo que temperaturas es más eficiente la operación de la turbina de gas de dos ejes.

Rajiv Ranjan, Mohammad Tariq (2015). *Efecto De La Temperatura Ambiente En Un Ciclo Combinado De Turbina De Gas Regenerativo Y De Recalentamiento Utilizando Matlab*. Publicado en India.

En el desarrollo reciente de ciclos de turbinas de gas, se aplica un nuevo software para calcular la eficiencia térmica y la potencia de salida de un ciclo combinado de recalentamiento y regeneración. Hay un compresor y una turbina que se utilizan en el ciclo de turbina de gas de regeneración, un compresor y dos turbinas que se utilizan en el ciclo recalentamiento. En el ciclo

combinado, en este trabajo se utilizan un compresor y dos turbinas, a saber, turbina HP y turbina LP. Se supone que la temperatura después del recalentamiento alcanza la misma temperatura que la entrada de la turbina HP.

Se construyó un modelo numérico completo para el motor. Este modelo tiene en cuenta las variaciones en el calor específico y los efectos del flujo de enfriamiento de la turbina. Además, el modelo considera las eficiencias de todos los componentes, la efectividad de los intercambiadores de calor y la caída de presión en los componentes relevantes. El análisis termodinámico se ha realizado utilizando el software MATLAB. Los parámetros tomados en el rango bien definido para la relación de presión general, las temperaturas de entrada de la turbina y la temperatura ambiente. El ciclo realiza el análisis de varias efectividades regenerativas y varias temperaturas de entrada a la turbina. Se encuentra que el caudal másico disminuye al aumentar la eficacia regenerativa mientras que aumenta al aumentar la temperatura de entrada a la turbina. En el estudio realizado en el artículo se encontró que el calor requerido en el quemador disminuye para mayor efectividad regenerativa.

Este proyecto tiene como fundamentos la ejecución de gráficas en el software MATLAB para el análisis de las propiedades que comprenden los ciclos termodinámicos, es por esto que contribuye un modelo sólido de lo que se debe tener en cuenta para realizar el procesamiento y digitalización de los datos numéricos y la ejecución de un análisis apropiado.

Mohammed Jasim Mohammed, DR. Mohammad Tariq (2014). *Análisis de un ciclo combinado de turbina de gas regenerativo y de recalentamiento utilizando MATLAB*.

Publicado en India.

En el presente trabajo, se desarrolla un método más sofisticado a partir del trabajo anterior y se utiliza para calcular los diversos parámetros de un ciclo de turbina de gas combinado. En el presente trabajo se ha tomado la combinación del ciclo de recalentamiento y regenerativo y el análisis termodinámico se ha realizado utilizando el software MATLAB 10. Los parámetros tomados en el rango bien definido para la relación de presión general, las temperaturas de entrada de la turbina y la temperatura ambiente. El ciclo realiza el análisis de varias eficacias regenerativas y se encuentra que la eficacia térmica se ha incrementado al aumentar la eficacia regenerativa. También se encontró que el calor requerido en el quemador disminuye para mayor efectividad regenerativa.

Como se mencionaba anteriormente, el desarrollo de este tipo de investigaciones son una referencia para construir una base teórica que permita el desarrollo correcto del modelo numérico tomando como guía las ecuaciones propuestas allí y su vez la implementación adecuada del software.

Marek Dzida, Jacek Frost (2017). *Funcionamiento de turbina de gas de dos ejes en la gama de válvula antisobresión abierta*. Universidad Tecnológica de Gdańsk, Facultad de Ingeniería Oceánica y Tecnología Naval, Polonia.

Este artículo presenta pruebas experimentales de una turbina de gas de dos ejes a gran escala en el rango de válvula anti-oleaje abierta (ASV). Las pruebas se llevaron a cabo en un banco de pruebas de turbinas de gas de laboratorio perteneciente al Departamento de Automatización e Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Oceánica y Tecnología Naval, Universidad Tecnológica de Gdańsk. Las pruebas cubrieron el arranque y operación a baja carga del conjunto turbina en el rango de válvula anti-surge abierta.

A manera de conclusión los autores as demostraron que en el arranque el rango de la turbina establecida, la turbina de gas opera con la válvula anti-surge abierta. Durante el arranque, la ASV se bloquea en función de un valor de la presión de aire detrás del compresor como resultado del proceso de control de la válvula.

Es importante conocer la parte experimental de los estudios, en el transcurso de este artículo se relata la implementación real de estos arreglos de dos ejes a gran escala por lo que aporta una noción de cómo sería el resultado esperado del proyecto en ejecución, a su vez muestran pruebas de variabilidad de las propiedades termodinámicas lo que permite tener una referencia de los cambios esperados en el ciclo Joule de dos ejes.

Thamir K. Ibrahim, M. M. Rahman, Obed M. Ali, Firdaus Basrawi y Rizalman Mamat (2016) *Estrategias De Mejora Del Rendimiento Óptimo De La Turbina De Gas Basadas En Las Temperaturas Efectivas*. Publicado por EDP Sciences.

Las turbinas de gas (TG) han llegado a desempeñar un papel importante en los sistemas energéticos distribuidos debido a su capacidad multicomcombustible, su tamaño compacto y su bajo

impacto ambiental y reducido coste. Sin embargo, el bajo rendimiento eléctrico, normalmente en torno al 30% (LHV), es un importante obstáculo para el desarrollo de las plantas GT. Se han diseñado nuevas estrategias para la planta GT, con el fin de aumentar el rendimiento global basado en el modelado operativo y la optimización de las plantas de energía GT. Las estrategias de mejora afectan al rendimiento de la central eléctrica de GT (con intercooler, dos ejes, recalentamiento y regeneración) basándose en la central eléctrica real de GT. Se ha llevado a cabo un análisis basado en la termodinámica sobre las modificaciones de las mejoras de las configuraciones del ciclo. A continuación, los resultados mostraron el efecto de las temperaturas ambiente y de entrada a la turbina en el rendimiento de las plantas de GT para seleccionar una estrategia óptima para la GT. El código del modelo de rendimiento para comparar las estrategias de las plantas GT se desarrolló utilizando el software MATLAB. Los resultados muestran que, la mejor eficiencia térmica se produce en la estrategia de GT intercooler-regenerativo-recalentado (IRHGT); disminuyó del 51,5 al 48%, cuando la temperatura ambiente aumentó (de 273 a 327K). Además, la eficiencia térmica del GT para las estrategias sin regenerativo aumentó (alrededor del 3,3%), mientras que la eficiencia térmica para las estrategias con regenerativo aumentó (alrededor del 22%) con el aumento de la temperatura de entrada de la turbina. El menor rendimiento térmico se produce en la estrategia IHGT, mientras que el mayor rendimiento térmico se produce en la estrategia IRHGT. Sin embargo, la variación de la potencia es más significativa a un valor más alto de la temperatura de entrada de la turbina. El modelo de simulación ofrece un resultado coherente en comparación con la planta GT de Baiji. La extensa modelización realizada en este estudio revela que; la temperatura ambiente y la temperatura de entrada de la turbina están fuertemente influenciadas en el rendimiento de la planta GT.

Esta investigación propone realizar un estudio minucioso de los diferentes factores que influyen en los comportamientos de los ciclos de turbina a gas y de esta forma poder plantear una estrategia que optimice el funcionamiento de estas plantas de producción de energía, parámetros que se pueden tener en cuenta durante el transcurso del presente proyecto para realizar de forma satisfactoria la investigación.

## **2.2. Marco Teórico**

Para afianzar el presente trabajo es importante tener en cuenta teóricos y autores que sustentan las variables del trabajo, por eso mismo se citan algunos de ellos. Se iniciará con la conceptualización del ciclo Joule y las turbinas a gas.

### ***2.2.1. Teoría del Ciclo Joule Brayton***

Brayton G. (1873) “comprendió el principio del funcionamiento del ciclo que nombro desde un inicio Joule Brayton, el cual se desarrolló al emplear una máquina de pistones con inyección de combustible para después realizarlo como un ciclo abierto simple, el cual se llama turbina a gas el cual se conoce como ciclo termodinámico, el fluido de trabajo no realiza un ciclo completo ya que el fluido que entra es aire y el que sale son gases de combustión, es decir en un estado diferente al que tenía cuando inicio el proceso, por lo tanto se le conoce como un ciclo abierto . Las turbinas de gas son máquinas térmicas rotativas de combustión interna a flujo continuo. El objetivo de esta máquina térmica es convertir energía calórica contenida en el combustible utilizado, en energía mecánica (trabajo mecánico) en el eje de la misma.”

Por lo anterior se puede afirmar que es importante tener en cuenta los principios fundamentales del funcionamiento del ciclo Joule Brayton el cual se desarrolló empleando una máquina de combustión interna y después implementarlo como un ciclo abierto simple denominado turbina, el fluido que utiliza el sistema, no realiza el ciclo completo ya que el fluido que entra es aire y el que sale son gases de combustión.

La máquina está compuesta de los siguientes elementos:

1. Un compresor de flujo axial
2. Una o varias cámaras de combustión (según el fabricante)
3. La turbina a gas
4. Sistemas auxiliares para su operación.

**2.2.1.1. Descripción del Ciclo Joule Brayton.** El ciclo Brayton describe el comportamiento ideal de un motor de turbina de gas, como los utilizados en las aeronaves. A continuación se muestran las etapas de este ciclo:

- **Admisión**

El aire frío y a presión atmosférica entra por la boca de la turbina

- **Compresor**

El aire es comprimido y dirigido hacia la cámara de combustión mediante un compresor (movido por la turbina). Puesto que esta fase es muy rápida, se modela mediante una compresión adiabática  $A \rightarrow B$ .

- **Cámara de combustión**

En la cámara, el aire es calentado por la combustión del queroseno. Puesto que la cámara está abierta el aire puede expandirse, por lo que el calentamiento se modela como un proceso isóbaro  $B \rightarrow C$ .

- **Turbina**

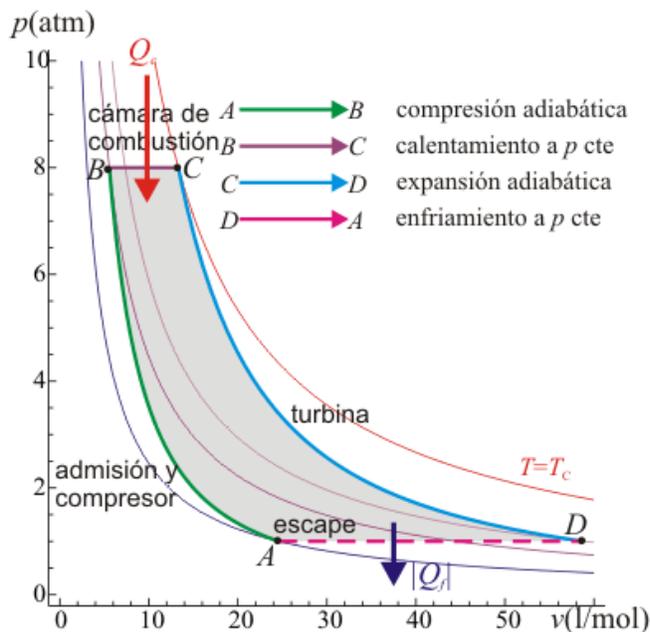
El aire caliente pasa por la turbina, a la cual mueve. En este paso el aire se expande y se enfría rápidamente, lo que se describe mediante una expansión adiabática  $C \rightarrow D$ .

- **Escape**

Por último, el aire enfriado (pero a una temperatura mayor que la inicial) sale al exterior. Técnicamente, este es un ciclo abierto ya que el aire que escapa no es el mismo que entra por la boca de la turbina, pero dado que sí entra en la misma cantidad y a la misma presión, se hace la aproximación de suponer una recirculación. En este modelo el aire de salida simplemente cede calor al ambiente y vuelve a entrar por la boca ya frío. En el diagrama PV esto corresponde a un enfriamiento a presión constante  $D \rightarrow A$ .

**Figura 1.**

*Diagrama del ciclo Brayton*



Nota. Universidad de Sevilla. (2009).

### 2.2.2. Teoría de las Turbinas a Gas

De acuerdo con Mohammed Jasim, y Dr. Mohammad Tariq (2014) “Las turbinas de gas se pueden dividir en categorías importantes, existen turbinas de gas industriales y turbinas de gas de motores a reacción, ambos tipos de turbinas de gas tienen un breve pero interesante trasfondo. Al diseñar una turbina de gas, debe estar capacitado en varios temas, para definir el compresor y la turbina, se necesita usar la aerodinámica para conseguir una combustión eficiente se requieren conocimientos de termodinámica. Finalmente, para asegurarse de que el motor sobreviva a las grandes diferencias de temperatura y las altas fuerzas debe estar familiarizado con las ciencias de los materiales. Se modela un ciclo de turbina de gas para

investigar los efectos de parámetros operativos importantes como la temperatura de entrada del compresor (CIT), la temperatura de entrada de la turbina (TIT) y la relación de presión (PR) en el rendimiento general del ciclo y las emisiones de CO<sub>2</sub>.”

Resumiendo lo que mencionan los teóricos anteriores, para diseñar una turbina de gas, se deben considerar diferentes aspectos para lograr una combustión óptima, en primer lugar, se necesitan conocimientos sobre termodinámica, así mismo para conseguir que el motor sobreviva a los cambios de temperatura, por lo tanto, se debe tener en cuenta las características metalúrgicas de los materiales.

**2.2.2.1. Ventajas y Desventajas de la Turbina a Gas.** Como lo señala Núñez Peralta, J. A., Perea Sánchez, J. A. (2014). Las turbinas a Gas presentan las siguientes ventajas:

- Muy buena relación potencia vs. Peso y tamaño
- Bajo costo de instalación
- Rápida puesta en servicio
- Es una máquina rotante (no tiene movimientos complejos como son los movimientos roto alternativos de los motores de combustión interna)
- Al ser una máquina rotante el equilibrado de la misma es prácticamente perfecto y simple, a diferencia de máquinas con movimiento alternativos
- Menos piezas en movimiento (comparado con los motores de combustión interna)
- Menores pérdidas por rozamiento al tener menores piezas en movimiento
- Sistema de lubricación más simple por lo expresado anteriormente

- Bajas presiones de trabajo (es la máquina térmica que funciona a más bajas presiones)
- El proceso de combustión es continuo y se realiza a presión constante en la cámara de combustión (diferente a los motores de combustión interna)
- Pocos elementos componentes: compresor, cámara/s de combustión y turbina propiamente dicha
- No necesitan agua (diferente a las turbinas a vapor que requieren de un condensador)
- Permiten emplear diferentes tipos de combustibles como kerosene, gasoil, gas natural, carbón pulverizado, siempre que los gases de combustión no corroan los álabes o se depositen en ellos
- El par motor es uniforme y continuo.

Las desventajas que presentan las turbinas a gas son las siguientes:

- Bajo rendimiento térmico (alto consumo específico de combustible).
- Alta pérdida de calor al ambiente que se traduce por la alta temperatura de salida de los gases de escape por chimenea, entre 495°C a 560 °C
- Gran parte de la potencia generada por la turbina es demandada por el compresor axial, en el orden de las  $\frac{3}{4}$  partes, o sea un 75% de la potencia total de la turbina

### ***2.2.3. Turbina a Gas de Dos Ejes***

Para el autor Fatsis A. (2019) “Las turbinas de gas de dos ejes (que emplean turbinas de energía libre) se utilizan ampliamente cuando se esperan variaciones de carga y la flexibilidad de

operación es de importancia primordial. Las tuberías, los compresores de gas y las hélices de paso fijo utilizadas en la propulsión marina son aplicaciones habituales.”

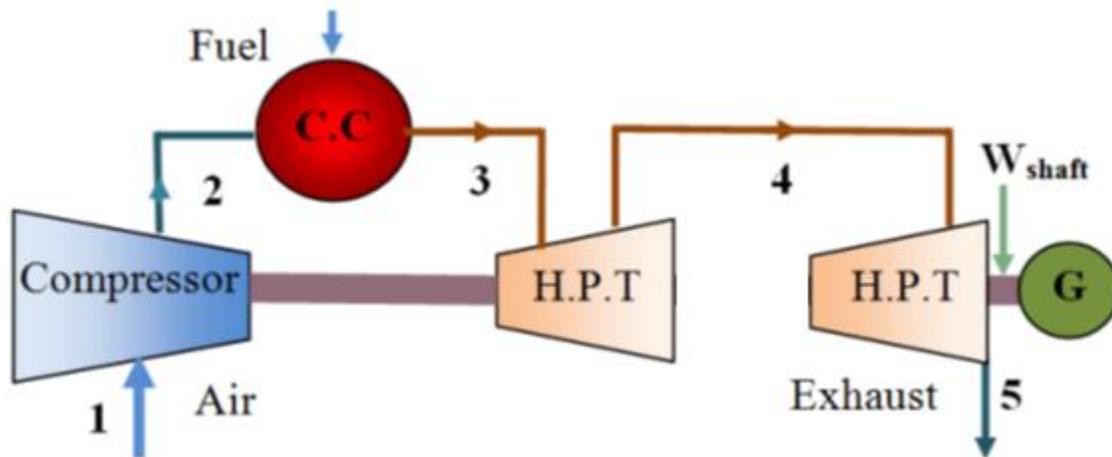
Una de las principales ventajas del motor de dos ejes es su mejor rendimiento fuera de su diseño y la poca potencia de arranque que necesita ya que solo el generador de gas necesita ser asistido durante el arranque.

Sin embargo, una desventaja es que el desprendimiento de la carga eléctrica puede darse por un exceso de velocidad de la turbina de potencia en los motores de dos ejes, la turbina del generador de gas proporciona solo la potencia necesaria para accionar el compresor.

En otro orden ideas se tiene a Ibrahim Thamir K., Rahman M. M. (2012). Que definen la base de una turbina de gas de dos ejes la cual consiste en un compresor que comprime el aire adiabáticamente el cual es dirigido a la cámara de combustión donde el combustible se quema con el aire, la máxima temperatura del ciclo ocurre en el estado 3 como resultado de la combustión. Los gases de escape producto del proceso de combustión se expandieron adiabáticamente en la turbina de alta presión, en otra parte del trabajo desarrollado en la turbina de alta presión se utilizó para impulsar el compresor, el restante se entregó para impulsar el generador de la turbina de gas. La turbina adicional se utiliza para impulsar el generador de turbina de gas el cual puede llamarse turbina de potencia, del mismo modo que los gases puedan expandirse de nuevo a la presión en la entrada del compresor. La turbina de gas de dos ejes ilustrada en la figura 2, en donde el compresor está encajado en el eje de la turbina de alta presión, mientras que la turbina de baja presión está encajado en un segundo eje que está mecánicamente separado del primero y activa la turbina de gas. El primer conjunto se llama generador de gas y la segunda turbina se llama turbina de potencia.

**Figura 2.**

*Diagrama esquemático de una turbina de gas de dos ejes.*



Nota. Elaboración propia de la adaptación de Ibrahim Thamir K., Rahman M. M. (2012).

[https://www.researchgate.net/publication/233991860\\_Parametric\\_study\\_of\\_a\\_two-shaft\\_gas\\_turbine\\_cycle\\_model\\_of\\_power\\_plant](https://www.researchgate.net/publication/233991860_Parametric_study_of_a_two-shaft_gas_turbine_cycle_model_of_power_plant)

### 2.3. Marco Conceptual

- **Ciclo Joule:** es un ciclo termodinámico consistente, en su forma más sencilla, en una etapa de compresión adiabática, una etapa de calentamiento isobárico y una expansión adiabática de un fluido termodinámico compresible.
- **Ciclo termodinámico:** Se denomina ciclo termodinámico al proceso que tiene lugar en dispositivos destinados a la obtención de trabajo a partir de dos fuentes de calor a distinta temperatura o, de manera inversa, a producir el paso de calor de la fuente de menor temperatura a la fuente de mayor temperatura mediante la aportación de trabajo.
- **Turbina a gas:** es un tipo de motor de combustión interna. Básicamente, el motor es como un dispositivo de conversión de energía, que transforma la energía almacenada en

el combustible en energía mecánica útil en forma de potencia de rotación. El término "gas" se refiere al aire ambiente que se introduce en el motor y se utiliza como medio de trabajo en el proceso de conversión de la energía.

- **Eje:** RAE. Barra, varilla o pieza similar que atraviesa un cuerpo giratorio y le sirve de sostén en el movimiento. Es un elemento constructivo destinado a guiar el movimiento de rotación de una pieza o de un conjunto de piezas, como una rueda o un engranaje.
- **Compresor:** Los compresores son máquinas que tienen por finalidad aportar una energía a los fluidos compresibles (gases y vapores) sobre los que operan, para hacerlos fluir aumentando al mismo tiempo su presión. En esta última característica precisamente, se distinguen de las soplantes y ventiladores que manejan grandes cantidades de fluidos compresibles (aire por ejemplo) sin modificar sensiblemente su presión, con funciones similares a las bombas de fluidos incompresibles.
- **Cámara de combustión (CC):** En las cámaras de combustión es donde se produce la reacción química fundamental para el funcionamiento de un motor. La mezcla aire y combustible se comprime por el recorrido ascendente del pistón, se enciende y se expande generando el movimiento descendente del pistón. Después, ese movimiento vertical se transforma en movimiento circular mediante el cigüeñal.
- **Eficiencia:** Oxford Languages. Capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función.
- **Potencia:** Es la cantidad de trabajo que se realiza por unidad de tiempo. Puede asociarse a la velocidad de un cambio de energía dentro de un sistema, o al tiempo que demora la concreción de un trabajo.

- **Efecto:** constituye un fenómeno que se genera por una causa específica y que aparece acompañado de manifestaciones puntuales que pueden ser establecidas de forma cualitativa y cuantitativa.
- **Sistema:** RAE. Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto.
- **Relación de compresión:** Es la diferencia de volumen de la mezcla aire/combustible (sólo aire en los motores diésel, pues el gasoil se inyecta posteriormente) cuando está comprimida y cuando ya se ha detonado en el interior del cilindro.
- **Temperatura:** es una magnitud escalar que se define como la cantidad de energía cinética de las partículas de una masa gaseosa, líquida o sólida. Cuanto mayor es la velocidad de las partículas, mayor es la temperatura y viceversa.
- **Industria:** es el conjunto de las actividades humanas capaces de transformar la materia prima en productos elaborados o semielaborados, a través de la realización de un trabajo mediante herramientas o maquinaria, recursos humanos y el consumo de energía.

#### 2.4. Fundamentos Legales

- **Decreto 948 de 1995 (junio 5) Diario Oficial No. 41.876 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE,** Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.
- **Artículo 73. PARAGRAFO 5o.** Las calderas u hornos que utilicen como combustible gas natural o gas licuado del petróleo, en un establecimiento industrial o comercial o para

la operación de plantas termoeléctricas con calderas, turbinas y motores, no requerirán permiso de emisión atmosférica. El Ministerio del Medio Ambiente podrá establecer las condiciones técnicas específicas para desarrollar las actividades a que se refiere el inciso anterior.

### **3. Diseño Metodológico**

La Universidad Francisco De Paula Santander, ofrece diferentes modalidades para la realización del trabajo de grado, entre las cuales se encuentran: proyecto de investigación, pasantías, trabajo dirigido, monografía y sistematización del conocimiento.

En marco de esto, el presente proyecto se realizará mediante la modalidad de proyecto investigación.

#### **3.1. Enfoque de la Investigación**

El enfoque de esta investigación es de tipo cuantitativo porque durante el desarrollo del proyecto se construirá un modelo numérico con base en fundamentos teóricos, de allí se generarán gráficas y resultados numéricos por medio del software seleccionado, estos resultados serán parte de un análisis para determinar parámetros importantes y así dar conclusión a esta investigación. , como lo describe Alan D & Cortez L (2018): "La investigación cuantitativa es una forma estructurada de recopilar y analizar datos obtenidos de distintas fuentes, lo que implica el uso de herramientas informáticas, estadísticas y matemáticas para obtener resultados. Es concluyente en su propósito ya que trata de cuantificar el problema y entender qué tan generalizado está mediante la búsqueda de resultados proyectables a una población mayor"

### 3.2. Tipo de Investigación

Con respecto a la naturaleza de la investigación de este proyecto se determina que es de tipo correlacional, tal como la define Hernández Sampieri R. (2014). “Este tipo de estudios tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular. En ocasiones sólo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio vínculos entre tres, cuatro o más variables.”

El uso principal de la investigación correlacional es saber cómo se puede comportar un concepto o una variable al conocer el comportamiento de otras variables relacionadas. Es decir, intentar predecir el valor aproximado que tendrá un grupo de personas o casos en una variable, en función del valor que tengan en las variables relacionadas. Como es el caso de esta investigación que se va a analizar el efecto que causa la variación de las propiedades termodinámicas, como son la temperatura y presión con respecto a la eficiencia y potencia de un ciclo Joule Brayton con turbina a gas de dos ejes.

### 3.3. Fuentes de Información

**3.3.1. Fuentes de Información Primaria.** Son las siguientes:

- Libros.
- Artículos de investigación.
- Repositorios.
- Revistas de ingeniería.

**3.3.2. Fuentes de Información Secundaria.** Son las siguientes:

- Páginas web.
- Asesorías.

### **3.4. Técnicas Para Interpretación y Análisis de Datos**

Para procesar el modelo numérico y finalmente interpretar dicha información se hará uso del Software MATLAB, el cuál para Cadado Cristina, en su texto "manual básico de MATLAB" lo define como "... Es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, y por tanto se puede trabajar también con números escalares (tanto reales como complejos), con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas." Es así, que se obtendrán esquemas y gráficas que permitirán realizar análisis de datos de las variaciones de las propiedades termodinámicas cómo presión y temperatura.

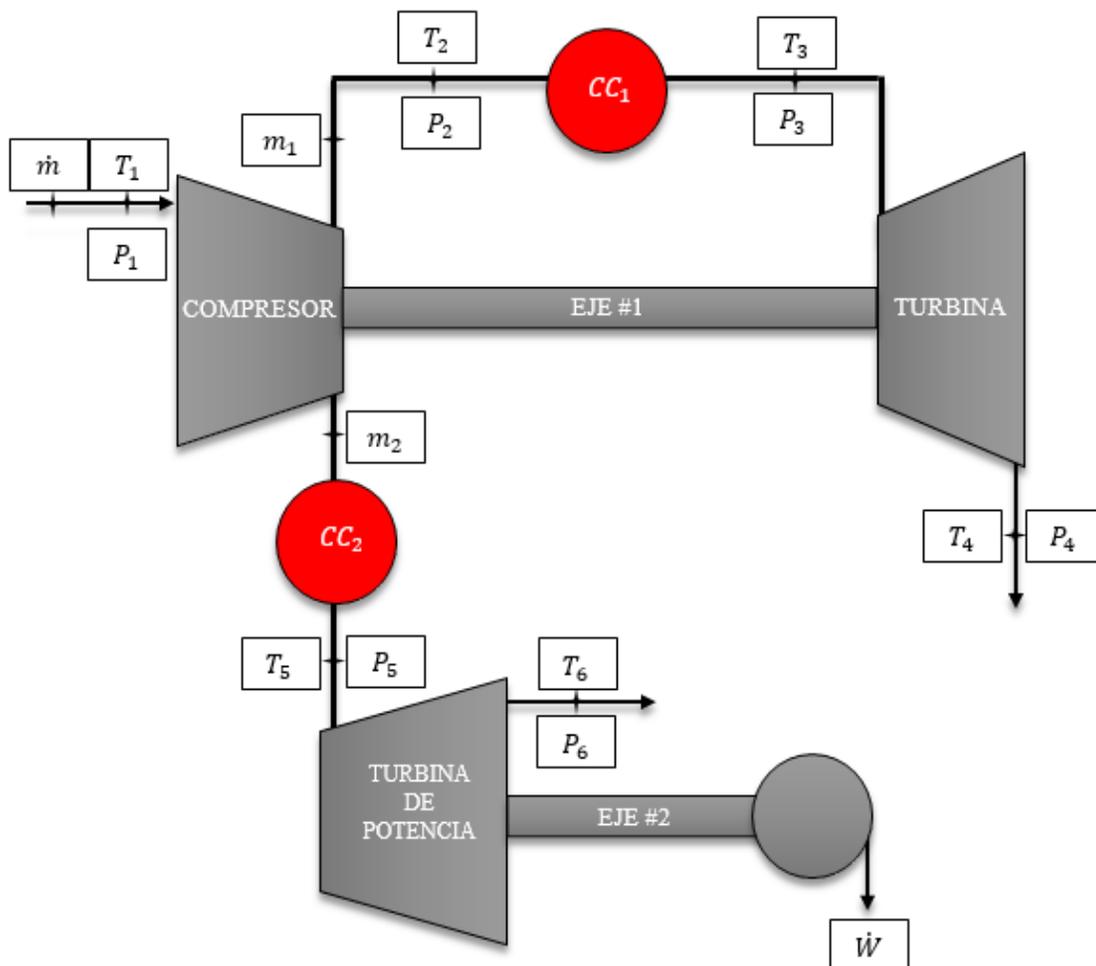
## 4. Modelo Numérico

### 4.1. Modelo Numérico Para un Ciclo Joule de Dos Ejes con Turbina Libre

Es importante ilustrar la figura 3, la cual permite comprender las ecuaciones y el desarrollo de los cálculos presentados posteriormente ya que en esta se evidencia la nomenclatura utilizada.

**Figura 3.**

*Diagrama del ciclo joule de dos ejes con turbina libre.*



Nota: Elaborado por autores.

## 4.2. Nomenclatura

- $T_1$ : Temperatura ambiente, (Unidad: K)
- $P_1$ : Presión atmosférica, (Unidad: Kpa )
- $T_2$ : Temperatura del aire a la salida del compresor, (Unidad: K )
- $P_2$ : Presión del aire a la salida del compresor, (Unidad: Kpa )
- $r_p$ : Relación de presión
- $T_3$ : Temperatura máxima en la primera cámara de combustión, (Unidad: K )
- $P_3$ : Presión del gas a la salida de la primera cámara de combustión, (Unidad: Kpa )
- $T_4$ : Temperatura del gas a la salida de la turbina de baja, (Unidad: K )
- $P_4$ : Presión del gas a la salida de la turbina de baja, (Unidad: Kpa )
- $T_5$ : Temperatura máxima en la segunda cámara de combustión, (Unidad: K )
- $P_5$ : Presión del gas a la salida de la segunda cámara de combustión, (Unidad: Kpa )
- $T_6$ : Temperatura del gas a la salida de la turbina de alta, (Unidad: K )
- $P_6$ : Presión del gas a la salida de la turbina de alta, (Unidad: Kpa )
- $CC_1$ : Cámara de combustión #1
- $CC_2$ : Cámara de combustión #2
- $C_{Pa}$ : Calor específico del aire, (Unidad: J/kg-k)

- $T_a$ : Temperatura del aire, (Unidad: K )
- $C_{pg}$ : Calor específico del gas (Unidad: kJ/kg-k)
- $T_g$ : Temperatura del gas, (Unidad: K )
- $\dot{m}$ : Flujo másico, (Unidad: Kg/s )
- $\bar{m}_1$ : Fracción #1 del flujo másico
- $\bar{m}_2$ : Fracción #2 del flujo másico
- $W_c$ : Trabajo del compresor, (Unidad: KJ/Kg )
- $W_t$ : Trabajo de la turbina, (Unidad: KJ/Kg )
- $W_N$ : Trabajo neto, (Unidad: KJ/Kg )
- $W_{tp}$ : Trabajo de la turbina de potencia, (Unidad: KJ/Kg )
- $\dot{Q}_s$ : Calor suministrado, (Unidad: KW)
- $\eta_{th}$ : Eficiencia térmica, (Unidad: % )
- $\dot{W}$ : Potencia que genera el ciclo joule de dos ejes, (Unidad: KW )
- $f$ : Combustible
- $SFC$ : Consumo de combustible, (Unidad: Kg/KW-h )

A continuación, se presenta un procedimiento de cálculo termodinámico para motores de turbina a gas de dos ejes el cual será usado como modelo numérico en el software MATLAB.

Temperatura del aire a la salida del compresor  $T_2$ . (Ecuación 1)

$$T_2 - T_1 = \frac{T_{2S} - T_1}{\eta_c} = \frac{T_1 \left[ \frac{T_{2S}}{T_1} - 1 \right]}{\eta_c}$$

$$T_2 = \frac{T_1}{\eta_c} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$T_2 = \frac{T_1}{\eta_c} \left[ (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$T_2 = T_1 \left[ 1 + \frac{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_c} \right] \quad (\text{Ec.1})$$

Presión del aire a la salida del compresor  $P_2$ . (Ecuación 2)

$$r_p = \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_2 = r_p * P_1 \quad (\text{Ec.2})$$

Presión del gas a la salida de la cámara de combustión  $P_3$ . (Ecuación 3)

$$P_3 = P_2 - \Delta P_b$$

$$P_3 = P_2 * \left[ 1 - \frac{\Delta P_b}{P_2} \right] \quad (\text{Ec.3})$$

Temperatura del gas a la salida de la turbina  $T_4$ . (Ecuación 4)

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4'}$$

$$T_3 - T_4 = \eta_t (T_3 - T_4')$$

$$T_4 = \eta_t * T_3 \left[ 1 - \frac{T_4'}{T_3} \right]$$

$$T_4 = \eta_t * T_3 \left[ 1 - \left( \frac{1}{r_p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

$$T_4 = T_3 \left[ 1 - \eta_t \left( 1 - \left( \frac{1}{r_p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right] \quad (\text{Ec.4})$$

Las presiones  $P_1, P_4, P_6$  son iguales

$$P_1 = P_4 = P_6$$

La presión del gas a la salida de la segunda cámara de combustión  $P_5$ . (Ecuación 5)

$$P_5 = P_3$$

$$P_5 = P_2 - \Delta P_b$$

$$P_5 = P_2 * \left[ 1 - \frac{\Delta P_b}{P_2} \right] \quad (\text{Ec.5})$$

Temperatura del gas a la entrada de la turbina  $T_5$ .

$$T_5 = T_3$$

Temperatura del gas a la salida de la turbina  $T_6$ . (Ecuación 6)

$$T_6 = T_5 \left[ 1 - \eta_t \left( 1 - \left( \frac{1}{r_p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right] \quad (\text{Ec.6})$$

El  $C_{pa}$  es el calor específico del aire que puede ser ajustado o variado por la Ecuación 7 para el rango de  $200\text{K} < T < 800\text{K}$  ( $r_p$ ) y  $\eta_m$  es la eficiencia mecánica del compresor y la turbina

(Rahman. 2011):

$$C_{pa} = 1,0189 * 10^3 - 0,13784 * T_a + (1,9843 * 10^{-4}) * T_a^2 + (4,2399 * 10^{-7}) * T_a^3 - (3,7632 * 10^{-10}) * T_a^4 \quad (\text{Ec.7})$$

$$T_a = \frac{T_2 + T_1}{2} \quad (\text{Ec. 8})$$

El  $C_{pg}$  es el calor específico del gas que puede ser ajustado o variado por la Ecuación 9

$$C_{pg} = 0,991615 + \left( \frac{6,99703 * T_g}{10^5} \right) + \left( \frac{2,7129 * T_g^2}{10^7} \right) - \left( \frac{1,22442 * T_g^3}{10^{10}} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

$$T_g = \frac{T_5 + T_6}{2} \quad (\text{Ec. 10})$$

El trabajo del compresor y el trabajo de la turbina son iguales, ya que la turbina mueve el compresor:

$$W_c = W_t$$

El caudal o flujo másico se despeja en dos fracciones por medio de la ecuación 11:

$$\dot{m} = \bar{m}_1 + \bar{m}_2 \quad (\text{Ec.11})$$

La Fracción #1 del flujo másico está dada por la ecuación 12:

$$m * C_{pa} * (T_2 - T_1) = (m * \bar{m}_1) * C_{pg} * (T_3 - T_4)$$

$$\bar{m}_1 = \left( \frac{C_{pa}}{C_{pg}} \right) * \left( \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} \right) \quad (\text{Ec. 12})$$

La Fracción #2 del flujo másico está dada por la ecuación 13:

$$\bar{m}_2 = (1 - \bar{m}_1) \quad (\text{Ec.13})$$

El trabajo neto es igual al trabajo de la turbina de potencia, que dado por la ecuación 14.

$$W_N = W_{tp} = (C_{Pg} * (T_5 - T_6)) * (n_m) \quad (\text{Ec.14})$$

El calor suministrado está dado por la ecuación 15.

$$\dot{Q}_s = \left( (C_{Pg} * T_3) - (C_{Pa} * T_2) \right) * (\dot{m} * \bar{m}_1) + \left( (C_{Pg} * T_5) - (C_{Pa} * T_2) \right) * (\dot{m} * \bar{m}_2) \quad (\text{Ec.15})$$

La potencia que genera el ciclo joule de dos ejes está dada por la ecuación 16.

$$\dot{W} = (\dot{m} * \bar{m}_2) * W_N \quad (\text{Ec.16})$$

La eficiencia térmica está dada por la ecuación 16.

$$\eta_{th} = \left( \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_s} \right) * 100 \quad (\text{Ec.17})$$

Por medio del despeje utilizando la ley de la termodinámica, se determinó la ecuación 18 para combustible (fuel)

$$\dot{m}_a * C_{pa}(T_2 - 298) + \dot{m}_f * LHV = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) * C_{pg} * T_3$$

$$C_{pa} * (T_2 - 298) + f * LHV = (1 + f) * C_{pg}(T_3 - 298)$$

$$f(LHV - C_{pg} * T_3) = C_{pg}(T_3 - 298) - C_{pa}(T_2 - 298)$$

$$f = \frac{C_{pg}(T_3 - 298) - C_{pa}(T_2 - 298)}{LHV - C_{pg}(T_3 - 298)} \quad (Ec. 18)$$

El consumo de combustible está dado por la siguiente ecuación 19.

$$SFC = \frac{3600 * f * \dot{m}}{\dot{W}} \quad (Ec. 19)$$

## 5. Análisis de Resultados

### 5.1. Datos de Entrada del Ciclo Joule de Dos Ejes

Para iniciar con las operaciones necesarias que permiten analizar el comportamiento del ciclo Joule de dos ejes se requiere de parámetros que se han generalizado para ser usados en los cálculos y los cuales se recopilaron en la siguiente tabla (tabla 1), asimismo se adjuntaron valores constantes ya establecidos.

**Tabla 1.**

*Datos de entrada del ciclo joule de dos ejes*

CARACTERISTICAS	SIMBOLO	VALOR
Eficiencia del compresor	$\eta_c$	85%
Eficiencia de la turbina	$\eta_t$	87%
Eficiencia mecánica	$\eta_m$	99%
Lower heating value (Poder calorífico inferior)	LHV	43100 (kJ/kg)
Perdidas de presión	$\Delta P_b$	2%
Flujo de masa	$\dot{m}$	18 (kg/s)
Coficiente adiabático del aire	$\gamma_{aire}$	1,4
Coficiente adiabático del gas	$\gamma_{gas}$	1,333
Temperatura ambiente	$T_1$	300 K
Presión atmosférica	$P_1$	100 Kpa

Nota: Elaborado por autores.

## 5.2. Caso 1. Variación de la Temperatura Máxima en la Cámara de Combustión

### Principal

El estudio del comportamiento del ciclo joule de dos ejes abordado en el desarrollo de la presente investigación inicia con la variación del valor de la temperatura máxima de la cámara de combustión ( $CC_1$ ) de la turbina de baja potencia, siendo seleccionados los siguientes valores de temperatura máxima: 1200 K, 1300K, 1400K y 1500K para realizar el respectivo análisis. Ya establecidos los valores de temperatura máxima para la cámara de combustión ( $CC_1$ ) y teniendo en cuenta los parámetros de la tabla 1 el software procede a realizar los cálculos necesarios para la recopilación de los datos (Tablas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9), con estos resultados se realizan las gráficas que permiten analizar el comportamiento del ciclo.

### Tabla 2.

*Resultados para temperatura máxima de 1200 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	T2	T4	T6	P2	P3	P5	Cpa	Cpg
3	430,14	953,45	949,43	300	294	294	1,0090	1,2282
6	535,94	826,66	823,28	600	588	588	1,0154	1,2133
9	608,27	762,05	759,00	900	882	882	1,0209	1,2054
12	664,92	720,03	717,19	1200	1176	1176	1,0258	1,2001
15	712,18	689,45	686,76	1500	1470	1470	1,0302	1,1963
18	753,09	665,69	663,13	1800	1764	1764	1,0343	1,1932
21	789,38	646,44	643,97	2100	2058	2058	1,0381	1,1908
24	822,14	630,35	627,96	2400	2352	2352	1,0416	1,1887
27	852,09	616,60	614,28	2700	2646	2646	1,0450	1,1869
30	879,75	604,63	602,37	3000	2940	2940	1,0481	1,1854

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 3.**

*Resultados para temperatura máxima de 1200 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	$\overline{m}_1$	$\overline{m}_2$	WN	PN	SFC	nth
3	0,4336	0,5664	304,66	3105,87	0,4842	16,59
6	0,5289	0,4711	452,49	3836,87	0,3429	23,38
9	0,5962	0,4038	526,25	3824,97	0,3107	25,74
12	0,6499	0,3501	573,64	3615,37	0,3012	26,50
15	0,6953	0,3047	607,83	3334,07	0,3017	26,39
18	0,7350	0,2650	634,21	3024,66	0,3087	25,73
21	0,7707	0,2293	655,49	2705,42	0,3214	24,66
24	0,8032	0,1968	673,19	2384,91	0,3402	23,24
27	0,8331	0,1669	688,26	2067,36	0,3666	21,51
30	0,8610	0,1390	701,33	1754,91	0,4037	19,48

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 4.**

*Resultados para temperatura máxima de 1300 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	T2	T4	T6	P2	P3	P5	Cpa	Cpg
3	430,14	1032,90	1028,55	300	294	294	1,0090	1,2476
6	535,94	895,55	891,89	600	588	588	1,0154	1,2330
9	608,27	825,56	822,25	900	882	882	1,0209	1,2250
12	664,92	780,03	776,95	1200	1176	1176	1,0258	1,2197
15	712,18	746,90	743,99	1500	1470	1470	1,0302	1,2158
18	753,09	721,17	718,39	1800	1764	1764	1,0343	1,2127
21	789,38	700,31	697,63	2100	2058	2058	1,0381	1,2101
24	822,14	682,88	680,29	2400	2352	2352	1,0416	1,2080
27	852,09	667,98	665,47	2700	2646	2646	1,0450	1,2062
30	879,75	655,02	652,57	3000	2940	2940	1,0481	1,2046

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 5.**

*Resultados para temperatura máxima de 1300 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	$\bar{m}_1$	$\bar{m}_2$	WN	PN	SFC	nth
3	0,3941	0,6059	335,27	3656,78	0,4729	17,10
6	0,4804	0,5196	498,16	4658,84	0,3302	24,45
9	0,5415	0,4585	579,41	4781,80	0,2947	27,34
12	0,5902	0,4098	631,59	4658,48	0,2809	28,64
15	0,6315	0,3685	669,23	4439,19	0,2759	29,12
18	0,6676	0,3324	698,25	4177,45	0,2757	29,10
21	0,7000	0,3000	721,66	3896,54	0,2789	28,72
24	0,7296	0,2704	741,13	3607,84	0,2849	28,07
27	0,7568	0,2432	757,70	3317,30	0,2936	27,20
30	0,7821	0,2179	772,07	3028,23	0,3051	26,13

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 6.**

*Resultados para temperatura máxima de 1400 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	T2	T4	T6	P2	P3	P5	Cpa	Cpg
3	430,14	1112,35	1107,67	300	294	294	1,0090	1,2645
6	535,94	964,43	960,49	600	588	588	1,0154	1,2508
9	608,27	889,06	885,50	900	882	882	1,0209	1,2431
12	664,92	840,03	836,72	1200	1176	1176	1,0258	1,2379
15	712,18	804,35	801,22	1500	1470	1470	1,0302	1,2340
18	753,09	776,64	773,65	1800	1764	1764	1,0343	1,2309
21	789,38	754,18	751,30	2100	2058	2058	1,0381	1,2284
24	822,14	735,41	732,62	2400	2352	2352	1,0416	1,2262
27	852,09	719,36	716,66	2700	2646	2646	1,0450	1,2244
30	879,75	705,40	702,77	3000	2940	2940	1,0481	1,2228

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 7.**

*Resultados para temperatura máxima de 1400 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	$\bar{m}_1$	$\bar{m}_2$	WN	PN	SFC	nth
3	0,3610	0,6390	365,95	4209,07	0,4652	17,50
6	0,4398	0,5602	544,24	5488,22	0,3217	25,26
9	0,4955	0,5045	633,19	5749,91	0,2844	28,54
12	0,5400	0,4600	690,32	5715,58	0,2683	30,21
15	0,5777	0,4223	731,51	5560,32	0,2605	31,08
18	0,6108	0,3892	763,28	5347,86	0,2571	31,46
21	0,6404	0,3596	788,88	5106,60	0,2564	31,51
24	0,6674	0,3326	810,18	4850,80	0,2577	31,32
27	0,6923	0,3077	828,31	4588,23	0,2606	30,94
30	0,7154	0,2846	844,02	4323,36	0,2648	30,41

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 8.**

*Resultados para temperatura máxima de 1500 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	T2	T4	T6	P2	P3	P5	Cpa	Cpg
3	430,14	1191,81	1186,79	300	294	294	1,0090	1,2784
6	535,94	1033,32	1029,10	600	588	588	1,0154	1,2663
9	608,27	952,57	948,75	900	882	882	1,0209	1,2592
12	664,92	900,03	896,48	1200	1176	1176	1,0258	1,2543
15	712,18	861,81	858,45	1500	1470	1470	1,0302	1,2506
18	753,09	832,12	828,91	1800	1764	1764	1,0343	1,2476
21	789,38	808,05	804,96	2100	2058	2058	1,0381	1,2452
24	822,14	787,94	784,95	2400	2352	2352	1,0416	1,2431
27	852,09	770,74	767,85	2700	2646	2646	1,0450	1,2413
30	879,75	755,79	752,97	3000	2940	2940	1,0481	1,2397

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 9.**

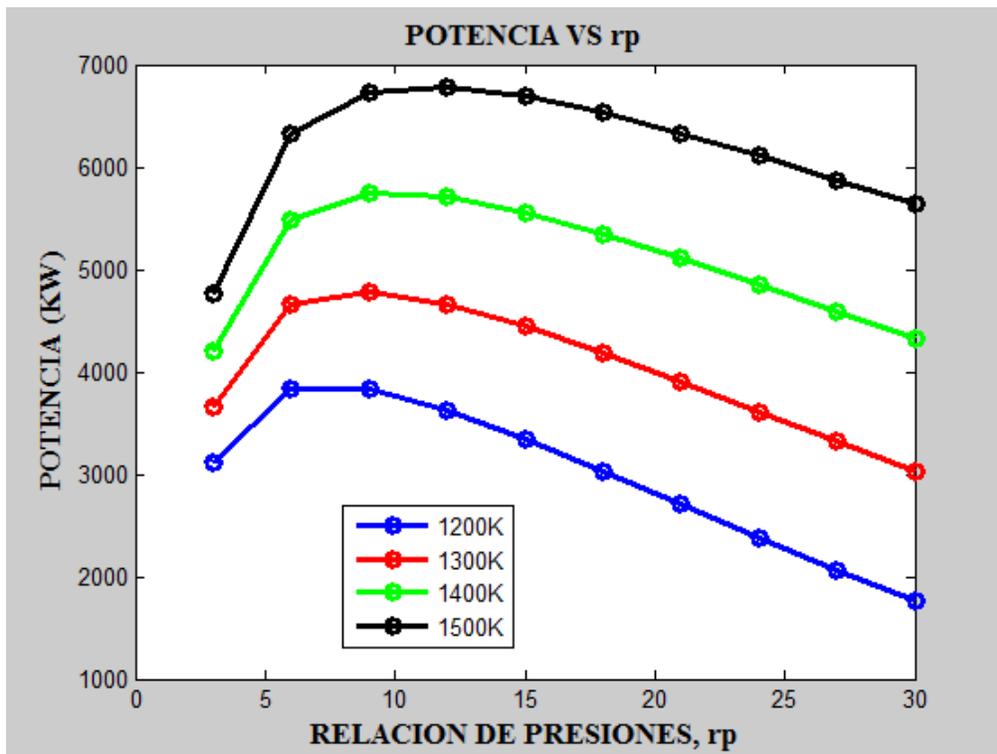
*Resultados para temperatura máxima de 1500 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	$\bar{m}_1$	$\bar{m}_2$	WN	PN	SFC	nth
3	0,3333	0,6667	396,39	4756,99	0,4599	17,81
6	0,4054	0,5946	590,35	6318,21	0,3159	25,90
9	0,4566	0,5434	687,21	6722,28	0,2774	29,46
12	0,4974	0,5026	749,43	6779,61	0,2600	31,40
15	0,5320	0,4680	794,30	6690,44	0,2507	32,54
18	0,5624	0,4376	828,89	6528,92	0,2455	33,20
21	0,5896	0,4104	856,78	6328,67	0,2428	33,54
24	0,6144	0,3856	879,97	6106,93	0,2418	33,65
27	0,6373	0,3627	899,70	5873,33	0,2421	33,59
30	0,6586	0,3414	916,81	5633,54	0,2434	33,39

Nota. Elaborado por autores.

**Figura 4.**

*Potencia Vs relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de principal.*

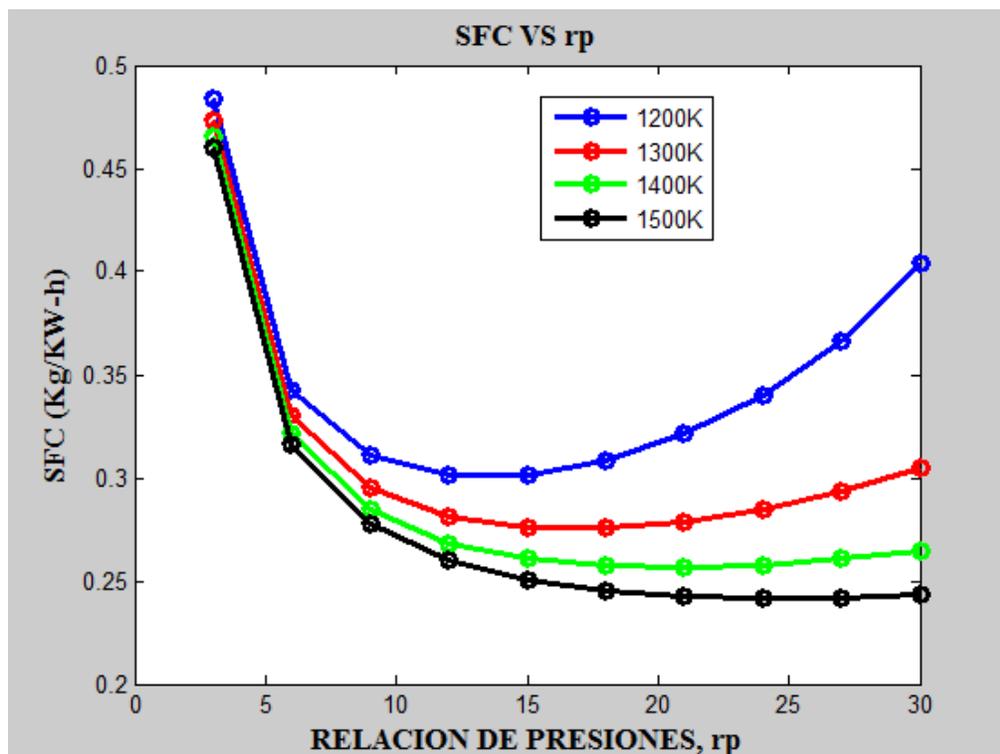


Nota. Elaborado por autores.

Teniendo en cuenta la comparación entre la potencia y la relación de presiones con respecto a la variación de la temperatura máxima, se evidencia en la gráfica de la figura 4 que este ciclo Joule de dos ejes entregaría mayor potencia a mayor temperatura máxima en la cámara de combustión 1, con respecto a la relación de presiones y a la potencia se observa que este ciclo trabaja mejor en la trayectoria de la curva de 1500 K obteniendo la mayor potencia en un  $r_p = 12$ .

**Figura 5.**

*Consumo específico de combustible VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de principal.*



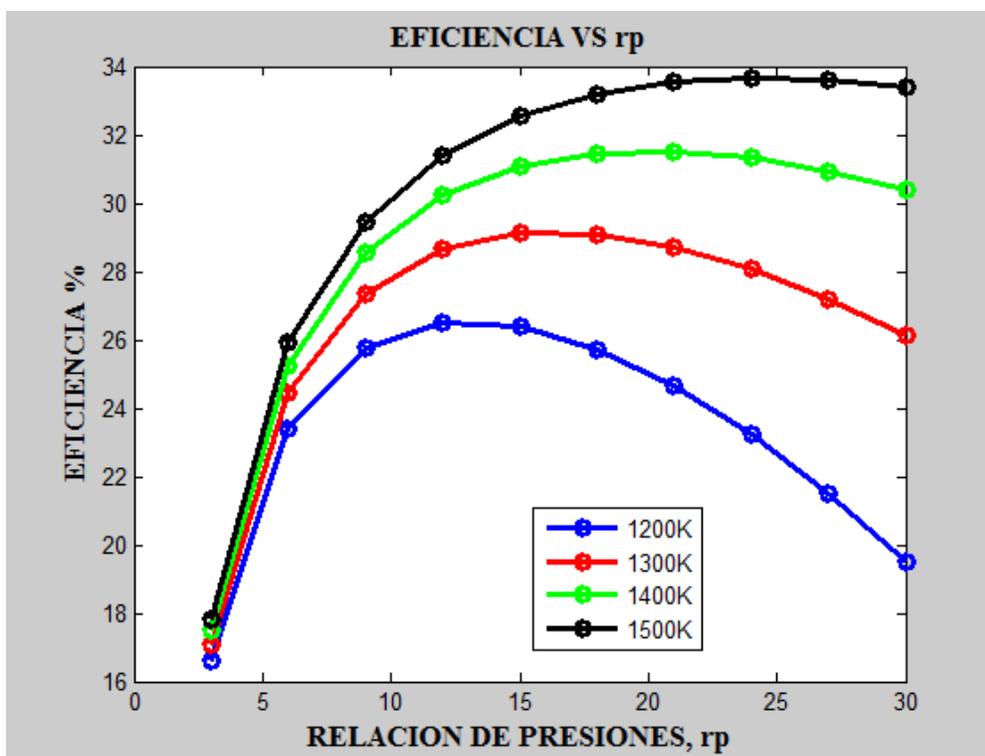
Nota. Elaborado por autores.

Analizando la variación de la temperatura máxima en la cámara de combustión 1 con respecto al consumo de combustible en este ciclo, se puede definir según la gráfica de la figura 5 que en este se requiere menos combustible para su funcionamiento al haber una mayor temperatura en la cámara de combustión, esto se debe a que a mayor temperatura aumenta el trabajo del ciclo por tanto la energía que debe entregar el combustible es menor; a su vez se evidencia que hay un rango en el que las curvas de mayor temperatura máxima tienden a ser

constantes como lo es en el intervalo de  $r_p$  [18 ,27] contrario a lo observado en la curva de menor temperatura máxima donde su trayectoria en ningún momento se muestra constante.

**Figura 6.**

*Eficiencia VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de principal.*



Nota. Elaborado por autores.

Según la figura 6 donde se refleja el comportamiento de la eficiencia de este ciclo en primera instancia se puede decir que no supera el 35% estando dentro del rango de lo que se espera en el funcionamiento de las turbinas a gas, en este caso al variar la temperatura máxima

en la cámara de combustión principal la turbina tendría mejor eficiencia térmica a una temperatura máxima de 1400 K seleccionándose esta para que no se superen los límites de relación de presiones de turbinas convencionales como sucede en el caso de la curva de 1500K donde se obtienen mejores resultados pero requiere de mayores propiedades mecánicas para su funcionamiento.

Teniendo en cuenta lo discutido anteriormente una temperatura de 1200 K no brinda los resultados idóneos que se esperan en el funcionamiento del ciclo reflejándose dicho comportamiento en las gráficas (Figuras 4, 5 y 6), asimismo al observar la trayectoria de una temperatura muy elevada aparentemente es la más acertada más sin embargo no es común encontrar materiales en las turbinas a gas que cumplan con las propiedades mecánicas requeridas.

### **5.3. Caso 2. Variación de la Temperatura Máxima en la Cámara de Combustión Secundaria**

Por otra parte, si en este ciclo joule de dos ejes se varía el valor de la temperatura máxima de la cámara de combustión ( $CC_2$ ) de la turbina de alta potencia en los siguientes valores de temperatura máxima: 1300 K, 1400K, 1500K y 1600K y se mantiene constante la temperatura máxima de la cámara de combustión de la turbina de baja potencia (1400K). Aplicando el modelo numérico por medio del software de MATLAB, se obtuvieron los siguientes datos.

**Tabla 10.**

*Resultados para temperatura máxima de 1300 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	T2	T4	T6	P2	P3	P5	Cpa	Cpg
3	430,14	1112,35	1028,55	300	294	294	1,0090	1,2476
6	535,94	964,43	891,89	600	588	588	1,0154	1,2330
9	608,27	889,06	822,25	900	882	882	1,0209	1,2250
12	664,92	840,03	776,95	1200	1176	1176	1,0258	1,2197
15	712,18	804,35	743,99	1500	1470	1470	1,0302	1,2158
18	753,09	776,64	718,39	1800	1764	1764	1,0343	1,2127
21	789,38	754,18	697,63	2100	2058	2058	1,0381	1,2101
24	822,14	735,41	680,29	2400	2352	2352	1,0416	1,2080
27	852,09	719,36	665,47	2700	2646	2646	1,0450	1,2062
30	879,75	705,40	652,57	3000	2940	2940	1,0481	1,2046

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 11.**

*Resultados para temperatura máxima de 1300 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	$\bar{m}_1$	$\bar{m}_2$	WN	PN	SFC	nth
3	0,3659	0,6341	335,27	3826,64	0,5039	17,23
6	0,4461	0,5539	498,16	4966,55	0,3492	24,78
9	0,5028	0,4972	579,41	5185,19	0,3093	27,88
12	0,5481	0,4519	631,59	5137,78	0,2923	29,41
15	0,5864	0,4136	669,23	4982,53	0,2844	30,15
18	0,6199	0,3801	698,25	4776,82	0,2812	30,41
21	0,6500	0,3500	721,66	4546,06	0,2810	30,34
24	0,6774	0,3226	741,13	4303,01	0,2831	30,04
27	0,7027	0,2973	757,70	4054,54	0,2870	29,55
30	0,7262	0,2738	772,07	3804,59	0,2926	28,90

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 12.**

*Resultados para temperatura máxima de 1400 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	T2	T4	T6	P2	P3	P5	Cpa	Cpg
3	430,14	1112,35	1107,67	300	294	294	1,0090	1,2645
6	535,94	964,43	960,49	600	588	588	1,0154	1,2508
9	608,27	889,06	885,50	900	882	882	1,0209	1,2431
12	664,92	840,03	836,72	1200	1176	1176	1,0258	1,2379
15	712,18	804,35	801,22	1500	1470	1470	1,0302	1,2340
18	753,09	776,64	773,65	1800	1764	1764	1,0343	1,2309
21	789,38	754,18	751,30	2100	2058	2058	1,0381	1,2284
24	822,14	735,41	732,62	2400	2352	2352	1,0416	1,2262
27	852,09	719,36	716,66	2700	2646	2646	1,0450	1,2244
30	879,75	705,40	702,77	3000	2940	2940	1,0481	1,2228

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 13.**

*Resultados para temperatura máxima de 1400 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	$\bar{m}_1$	$\bar{m}_2$	WN	PN	SFC	nth
3	0,3610	0,6390	365,95	4209,07	0,4652	17,50
6	0,4398	0,5602	544,24	5488,22	0,3217	25,26
9	0,4955	0,5045	633,19	5749,91	0,2844	28,54
12	0,5400	0,4600	690,32	5715,58	0,2683	30,21
15	0,5777	0,4223	731,51	5560,32	0,2605	31,08
18	0,6108	0,3892	763,28	5347,86	0,2571	31,46
21	0,6404	0,3596	788,88	5106,60	0,2564	31,51
24	0,6674	0,3326	810,18	4850,80	0,2577	31,32
27	0,6923	0,3077	828,31	4588,23	0,2606	30,94
30	0,7154	0,2846	844,02	4323,36	0,2648	30,41

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 14.**

*Resultados para temperatura máxima de 1500 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	T2	T4	T6	P2	P3	P5	Cpa	Cpg
3	430,14	1112,35	1186,79	300	294	294	1,0090	1,2784
6	535,94	964,43	1029,10	600	588	588	1,0154	1,2663
9	608,27	889,06	948,75	900	882	882	1,0209	1,2592
12	664,92	840,03	896,48	1200	1176	1176	1,0258	1,2543
15	712,18	804,35	858,45	1500	1470	1470	1,0302	1,2506
18	753,09	776,64	828,91	1800	1764	1764	1,0343	1,2476
21	789,38	754,18	804,96	2100	2058	2058	1,0381	1,2452
24	822,14	735,41	784,95	2400	2352	2352	1,0416	1,2431
27	852,09	719,36	767,85	2700	2646	2646	1,0450	1,2413
30	879,75	705,40	752,97	3000	2940	2940	1,0481	1,2397

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 15.**

*Resultados para temperatura máxima de 1500 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	$\bar{m}_1$	$\bar{m}_2$	WN	PN	SFC	nth
3	0,3571	0,6429	396,39	4587,13	0,4322	17,72
6	0,4344	0,5656	590,35	6010,49	0,2983	25,68
9	0,4892	0,5108	687,21	6318,88	0,2633	29,10
12	0,5330	0,4670	749,43	6300,31	0,2480	30,91
15	0,5701	0,4299	794,30	6147,09	0,2404	31,89
18	0,6026	0,3974	828,89	5929,55	0,2368	32,38
21	0,6317	0,3683	856,78	5679,14	0,2357	32,54
24	0,6583	0,3417	879,97	5411,76	0,2364	32,45
27	0,6829	0,3171	899,70	5136,10	0,2385	32,18
30	0,7057	0,2943	916,81	4857,18	0,2418	31,75

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 16.**

*Resultados para temperatura máxima de 1600 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	T2	T4	T6	P2	P3	P5	Cpa	Cpg
3	430,14	1112,35	1265,91	300	294	294	1,0090	1,2887
6	535,94	964,43	1097,71	600	588	588	1,0154	1,2791
9	608,27	889,06	1012,00	900	882	882	1,0209	1,2730
12	664,92	840,03	956,25	1200	1176	1176	1,0258	1,2686
15	712,18	804,35	915,68	1500	1470	1470	1,0302	1,2652
18	753,09	776,64	884,17	1800	1764	1764	1,0343	1,2624
21	789,38	754,18	858,63	2100	2058	2058	1,0381	1,2601
24	822,14	735,41	837,28	2400	2352	2352	1,0416	1,2582
27	852,09	719,36	819,04	2700	2646	2646	1,0450	1,2565
30	879,75	705,40	803,16	3000	2940	2940	1,0481	1,2550

Nota. Elaborado por autores.

**Tabla 17.**

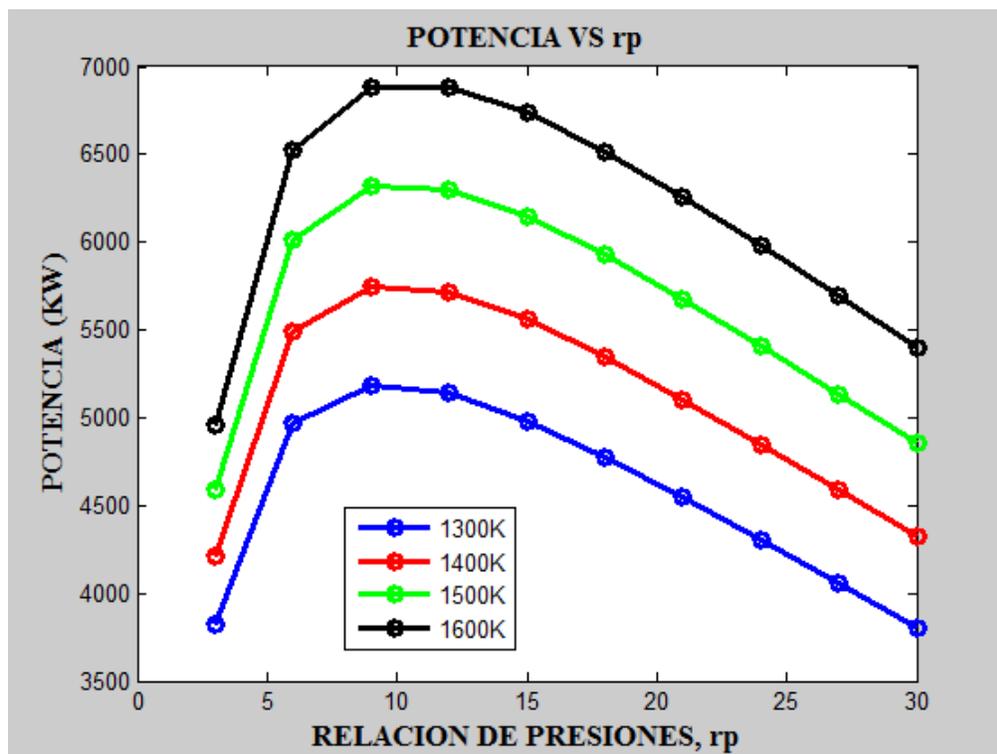
*Resultados para temperatura máxima de 1600 K obtenidos en el procesamiento por medio del software MATLAB.*

$r_p$	$\bar{m}_1$	$\bar{m}_2$	WN	PN	SFC	nth
3	0,3542	0,6458	426,23	4954,30	0,4038	17,91
6	0,4300	0,5700	636,05	6525,55	0,2782	26,04
9	0,4839	0,5161	741,02	6884,05	0,2452	29,59
12	0,5270	0,4730	808,48	6883,86	0,2306	31,50
15	0,5635	0,4365	857,13	6734,75	0,2232	32,59
18	0,5955	0,4045	894,65	6513,82	0,2196	33,18
21	0,6242	0,3758	924,89	6255,68	0,2182	33,43
24	0,6504	0,3496	950,04	5977,92	0,2184	33,44
27	0,6746	0,3254	971,45	5690,21	0,2199	33,26
30	0,6971	0,3029	990,00	5398,17	0,2225	32,92

Nota. Elaborado por autores.

**Figura 7.**

*Potencia VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de combustión secundaria.*



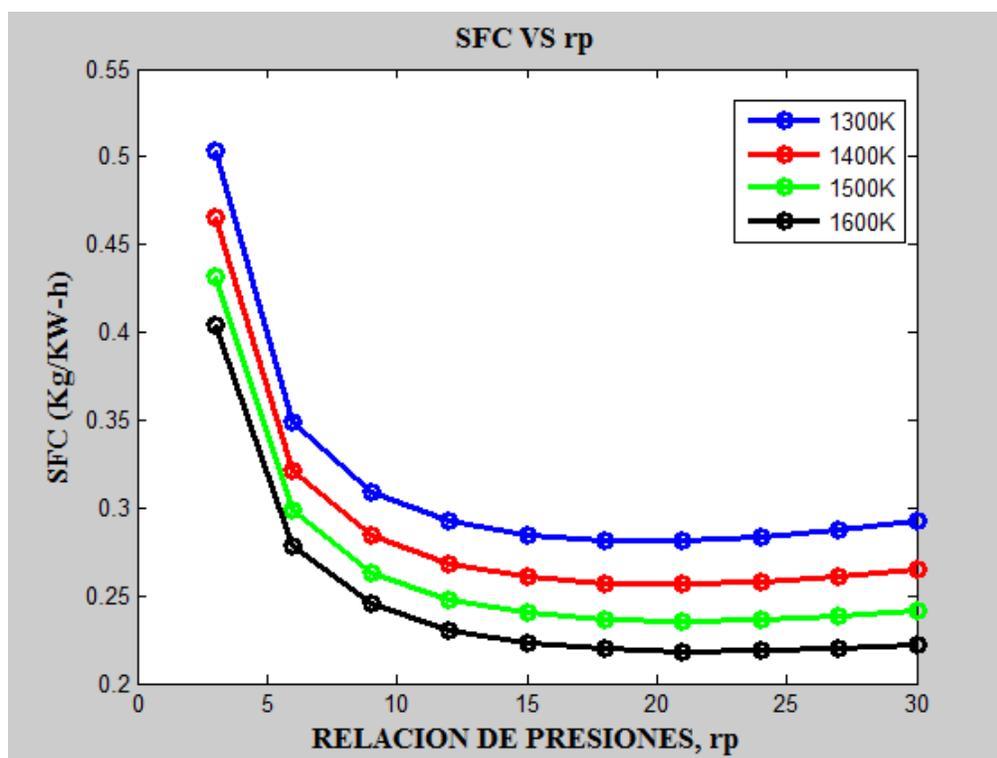
Nota. Elaborado por autores.

Si se observa la gráfica de potencia VS relación de presiones de la figura 7 y se realiza un paralelo con la gráfica de la figura 4 se puede determinar que al mantener constante la temperatura máxima de la cámara de combustión principal en 1400K la cual es la más adecuada para su funcionamiento y se varía la temperatura en la cámara de combustión secundaria disminuye la entrega de potencia; esto se ve expuesto en la curva correspondiente a una temperatura máxima de 1500 K (figura 7), en la cual para el primer caso (figura 4) se obtuvo una

potencia de 6779,61 KW en un  $r_p=12$  en esta misma relación de presiones para el segundo caso se consigue una potencia de 6300,31 KW evidenciándose la caída de potencia.

### Figura 8.

*Consumo específico de combustible VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de combustión secundaria.*



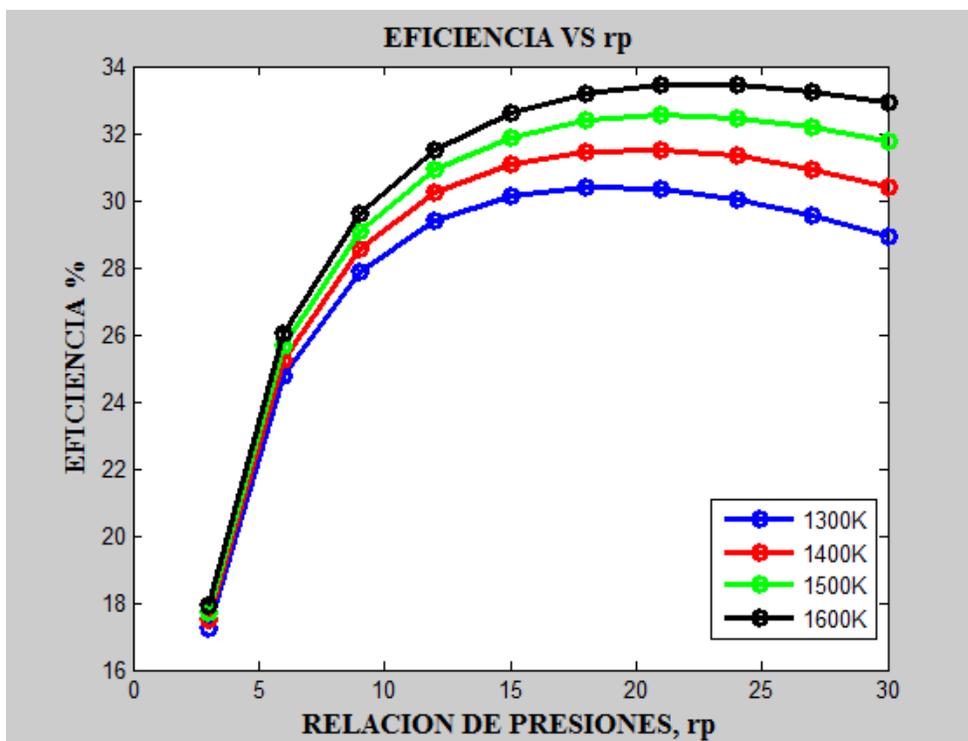
Nota. Elaborado por autores.

En el caso del consumo específico de combustible estudiado en la variación de la temperatura en la cámara de combustión secundaria, se observa que esta mejora ya que

disminuye, pero analizando el caso 2 en general se tendría un consumo de combustible más bajo, pero a su vez una entrega de potencia inferior comparado con el caso 1 esto quiere decir que aunque disminuya el consumo de combustible no es recomendable la variación realizada en el segundo caso.

**Figura 9.**

*Eficiencia VS relación de presiones para la variación de la temperatura máxima de la cámara de combustión secundaria.*



Nota. Elaborado por autores.

Se obtiene una eficiencia menor que en el caso 1 al trabajar con esta configuración en la que la temperatura de la cámara de combustión principal se mantiene constante en 1400K y se varia la segunda, esto sucede porque en el caso 2 la potencia obtenida disminuye si se observa la ecuación de la eficiencia térmica estos valores están relacionados lo cual causa la disminución de la eficiencia.

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

De la presente investigación se logró estudiar un arreglo del ciclo joule poco convencional tal como lo es el ciclo joule de dos ejes de turbina libre, dicho estudio se desarrolló satisfactoriamente al crear un modelo numérico que ofrece obtener resultados muy cercanos a la realidad ya que permite trabajar con rangos de valores en las variables que influyen en dichos resultados; el modelo numérico fue procesado en el software de MATLAB el cual realizó los cálculos necesarios para hallar parámetros importantes como lo son la potencia, la eficiencia y el consumo de combustible del ciclo, posterior a esto el software comparó la variación de las temperaturas y presiones seleccionadas en este estudio con los parámetros anteriormente nombrados.

Durante el desarrollo de este proyecto la variación de la temperatura se realizó seleccionando un rango de temperaturas las cuales están dentro del funcionamiento comercial de las turbinas a gas, estos valores fueron implementados en cada cámara de combustión para observar su comportamiento, de esto se puede concluir que al hacer trabajar la cámara de combustión principal y secundaria en los mismos valores de temperatura se obtuvieron mejores resultados en general comparado con el caso 2 donde se mantenía constante la temperatura de la cámara principal y se variaba la de la secundaria, esto se ve reflejado en las trayectorias de la potencia y la eficiencia analizados en las gráficas.

Al observar el comportamiento de la entrega de potencia del ciclo es evidente que a mayor temperatura aumenta la potencia hasta llegar a un punto de funcionamiento óptimo y después de este la curva empieza a descender, en el caso de variar las temperaturas de la cámara de combustión secundaria no se obtuvieron mejoras en el ciclo es por esto que se recomienda

realizar estudios variando otros parámetros fuera del alcance de este proyecto, como por ejemplo el flujo de masa esto por medio de la implementación de una válvula en el ciclo, con el fin de analizar si se puede mejorar y obtener un funcionamiento más óptimo.

Con respecto al consumo específico de combustible se puede concluir que a mayor temperatura máxima menor es el consumo siendo esto un resultado favorable ya que ofrece mejor rentabilidad y óptimo funcionamiento a la turbina a gas, también es notorio que hay una tendencia en las curvas de SFC a mantenerse constantes en las temperaturas más altas seleccionadas.

En el caso de la potencia y la eficiencia se puede determinar que a mayor temperatura estos parámetros aumentan, para el caso 2 se observa un decrecimiento en comparación del caso 1 por lo que se puede decir que este último es el más adecuado para su implementación según la investigación realizada.

Se recomienda realizar en futuras investigaciones una comparación con otro ciclo de trabajo, ya sea en otras configuraciones del ciclo joule o con un ciclo combinado (gas – vapor) para determinar que ciclo es más conveniente para la implementación en la industria.

## 7. Referencias Bibliográficas

Alan D. y Cortes L. (2018). Procesos y Fundamentos de la Investigación Científica. Universidad técnica de Machala. Machala – Ecuador.

Casado Cristina, Manual básico de MATLAB. Servicios Informáticos U.C.M, Apoyo a Investigación y Docencia. Recuperado de <https://webs.ucm.es/centros/cont/descargas/documento11541.pdf>

Ciclo termodinámico Termosistemas. Tu portal de refrigeración en Internet. (s. f.). 2014. Recuperado 21 de septiembre de 2022, de <http://www.termosistemas.com.ar/sitio/vernota.php?nota=221>

Definición de efecto - Definicion.de. (s. f.). Definición.de. Recuperado 21 de septiembre de 2022, de <https://definicion.de/efecto/>

Definición de potencia - Definicion.de. (s. f.). Definición.de. Recuperado 21 de septiembre de 2022, de <https://definicion.de/potencia/#:%7E:text=La%20potencia%20es%20la%20cantidad,total%20dividida%20por%20el%20tiempo.>

Donaire, D. L. (2021, 27 mayo). Cámaras de combustión: para qué sirven y tipos. Actualidad Motor. Recuperado 21 de septiembre de 2022, de <https://www.actualidadmotor.com/tipos-de-camaras-de-combustion/>

Dzida, M. & Frost, J. (2017). Operation of Two-Shaft Gas Turbine in the Range of Open Anti-Surge Valve. Polish Maritime Research, 24 (4) 85-92. Gdańsk University of Technology, Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology, Poland. Recuperado de <https://sciendo.com/es/article/10.1515/pomr-2017-0139>

Fatsis, A. (2019). Design point analysis of two-shaft gas turbine engines topped by four-port wave rotors for power generation systems. Grecia General Department, National and Kapodestrian University of Athens, Evripus Complex, Psachna, 34400 Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/335375349\\_Design\\_point\\_analysis\\_of\\_two-shaft\\_gas\\_turbine\\_engines\\_topped\\_by\\_four-port\\_wave\\_rotors\\_for\\_power\\_generation\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/335375349_Design_point_analysis_of_two-shaft_gas_turbine_engines_topped_by_four-port_wave_rotors_for_power_generation_systems)

Fernández Díez P (2022). Compresores. Tomado de <https://docplayer.es/14200487-Compresores-pfernandezdiez-es-pedro-fernandez-diez.html>

Hernández Sampieri R. (2014). Metodología de la investigación. DERECHOS RESERVADOS ©, respecto a la sexta edición por MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. México D.F.

Ibrahim Thamir K., Rahman M. M. (2012). Parametric study of a two-shaft gas turbine cycle model of power plant. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang 26600 Pekan, Pahang, Malaysia Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/233991860\\_Parametric\\_study\\_of\\_a\\_two-shaft\\_gas\\_turbine\\_cycle\\_model\\_of\\_power\\_plant](https://www.researchgate.net/publication/233991860_Parametric_study_of_a_two-shaft_gas_turbine_cycle_model_of_power_plant)

Ibrahim Thamir K., Rahman M. M., Obed M. Ali, Firdaus Basrawi y Rizalman Mamat (2016). Optimum performance enhancing strategies of the gas turbine based on the effective temperatures. Energy Sustainability Focus Group (ESFoG), Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/290196009\\_Optimum\\_Performance\\_Enhancing\\_Strategies\\_of\\_the\\_Gas\\_Turbine\\_Based\\_on\\_the\\_Effective\\_Temperatures](https://www.researchgate.net/publication/290196009_Optimum_Performance_Enhancing_Strategies_of_the_Gas_Turbine_Based_on_the_Effective_Temperatures)

Industria - Concepto, historia, tipos, ejemplos y características. (s. f.). Concepto. Recuperado 21 de septiembre de 2022, de <https://concepto.de/industria/#:%7E:text=La%20industria%20es%20el%20conjunto,y%20el%20consumo%20de%20energ%C3%ADa.>

Jones J.B. y Dugan R.E. *Ingeniería Termo dinámica*. México, DF. Prentice-Hall Hispanoamérica, S.A. 1997.

Mohammed, M.J., Tariq, M.A., & Prof., A. (2014). Analysis of a Combined Regenerative and Reheat Gas Turbine Cycle using MATLAB. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-a-Combined-Regenerative-and-Reheat-Gas-Mohammed-Tariq/69a53dc4e05f76c646e48e8e2d5c5c85d0e408b8>

Núñez Peralta, J. A., Perea Sanchez, J. A. (2014). Análisis comparativo técnico-económico entre sistemas de cogeneración con ciclo joule-brayton y ciclo rankine aplicados a una planta industrial azucarera. Universidad católica de santa maría, Arequipa. Recuperado de [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM\\_47d4097ec75760fc6ad19604ffa1b433](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM_47d4097ec75760fc6ad19604ffa1b433)

Plaza, D. (2020, 22 abril). ¿Qué es la relación de compresión? Motor.es. Recuperado 21 de septiembre de 2022, de <https://www.motor.es/que-es/relacion-de-compresion>

Poku, R. (2014). Thermodynamics Performance Evaluation of a Two-Shaft Gas Turbine Power Plant. Department of Mech/Marine Engineering, Niger Delta University, Wilberforce Island, Bayelsa State, Nigeria. International Journal of Engineering Research & Technology

(IJERT) Vol. 3 Issue 1, Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Thermodynamics-Performance-Evaluation-of-a-Gas-Poku/0c3c529e9063b396b1ab49a663f15af7b498c5bf>

Ranjan, R., & Tariq, M.A. (2015). EFFECT OF AMBIENT TEMPERATURE ON A COMBINED REGENERATIVE AND REHEAT GAS TURBINE CYCLE USING MATLAB. India. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 10 Recuperado de [https://www.semanticscholar.org/paper/EFFECT-OF-AMBIENT-TEMPERATURE-ON-A-COMBINED-AND-GAS-Ranjan Tariq/7c41bee34966a82ef4485e792689b81d710a4a38](https://www.semanticscholar.org/paper/EFFECT-OF-AMBIENT-TEMPERATURE-ON-A-COMBINED-AND-GAS-Ranjan-Tariq/7c41bee34966a82ef4485e792689b81d710a4a38)

Real academia Española. (2021) Recuperado de <https://dle.rae.es/eje>

Real academia Española. (2021) Recuperado de <https://dle.rae.es/sistema>

Rus Enrique (2022), **Investigación cuantitativa.**

Recuperado de <https://economipedia.com/definiciones/investigacion-cuantitativa.html>

Salinas Meruane P., y Cárdenas Castro M. (2008). Métodos de investigación social. Ediciones Universidad Católica del Norte. Chile.

Temperatura - Concepto, tipos, escalas y medición. (s. f.). Concepto. Recuperado 21 de septiembre de 2022, de <https://concepto.de/temperatura/>

Turbina a gas (2021). Recuperado de [https://www.solarturbines.com/es\\_MX/products/gas-turbines.html](https://www.solarturbines.com/es_MX/products/gas-turbines.html)

Universidad de Sevilla. (2009). Diagrama del ciclo Brayton

Fuente: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo\\_Brayton](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Brayton)

Universidad Francisco de Paula Santander. (2017). Departamento de electricidad y electrónica. Licencia de MATLAB.

Vásquez Hidalgo Isabel. (2005). **Tipos de estudio y métodos de investigación.**

Recuperado de <https://www.gestiopolis.com/tipos-estudio-metodos-investigacion/>

## **Anexos**

## Anexos del programa variando la primera cámara de combustión

### Anexo A. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_1.m Page 1  
 23 de abril de 2023 23:46:42

```

1 clc;
2 load('Constantes.mat');
3
4 %Procedimiento de problema
5
6 %Temperatura maxima 1
7 disp ('TEMPERA MAXIMA #1')
8 m = input('Digite el flujo de masa(Kg/s):');
9 T1 = input('Digite la temperatura(K) de entrada (T1):');
10 P1 = input('Digite la presion(KPa) de entrada (P1):');
11 T3 = input('Digite la temperatura(K) maxima (T3):');
12 rpi = input('Digite la relacion de presion:');
13 incr = input('Especificar el incremento entre lineas:');
14 nlt = input('Especificar el número de lineas:');
15 rpf = nlt*incr;
16 rp = (rpi:incr:rpf);
17 T2 = T1*(1+1/nc*(rp.^gama-1));
18 P2 = rp*P1;
19 P3 = P2*pb;
20 disp('La Presion 4 esta dada en KPa')
21 P4 = P1;
22 disp('P4='),disp(P4)
23 T4 = T3*(1-nt*(1-((P4./P3).^gamg)));
24 disp('La Temperatura 5 esta dada en Kelvin (K)')
25 T5 = T3;
26 disp('T5='),disp(T5)
27 P5 = P3;
28 T6 = T5*(1-nt*(1-(1./rp.^gamg)));
29 disp('La Presion 6 esta dada en KPa')
30 P6 = P1;
31 disp('P6='),disp(P6)
32 disp('Las temperaturas estan dadas en kelvin (K) y las presiones estan dadas en
KPa')
33 Tabla = table(rp',T2',T4',T6',P2',P3',P5', 'VariableNames',
{'Rp', 'T2', 'T4', 'T6', 'P2', 'P3', 'P5'});
34 disp(Tabla)
35 Ta = (T2+T1)./2;
36 Tg = (T5+T6)./2;
37 Cpa = ((1.0189*10.^3)-(0.13784*Ta)+((1.9843*10.^-4)*Ta.^2)+((4.2399*10.^-7)*Ta.^3)
-((3.7632*10.^-10)*Ta.^4))/1000;
38 Cpg = (0.991615)+((6.99703*Tg)./(10.^5))+((2.7129*Tg.^2)./(10.^7))-((1.22442*Tg.^
^3)./(10.^10));
39 disp('Los calores especificos del Aire (Cpa) y del Gas (Cpg) estan dados en kj/kg.
k')
40 Tabla_Cp = table(rp',Cpa',Cpg', 'VariableNames', {'rp', 'Cpa', 'Cpg'});
41 disp(Tabla_Cp)
42 disp('Los flujos de masa estan dados en kg/s')
43 m1 = (Cpa./Cpg).*((T2-T1)./(T3-T4));
44 m2 = 1-m1;
45 Tabla_m = table(rp',m1',m2', 'VariableNames', {'rp', 'm1', 'm2'});
46 disp(Tabla_m)
47 WN = (Cpg.*(T5-T6)).*nm;
48 qs = (((Cpg.*T3)-(Cpa.*T2)).*(m.*m1))+(((Cpg.*T5)-(Cpa.*T2)).*(m.*m2));

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo B. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_1.m  
23 de abril de 2023

Page 2  
23:46:42

```

49 PN = (m.*m2).*WN;
50 nth = (PN./qs)*100;
51 f = ((Cpg.*(T3-298))-(Cpa.*(T2-298)))/(LHV-(Cpg.*(T3-298)));
52 SFC = (3600.*(f).*(m))./PN;
53 disp('-El trabajo Neto (WN)esta dado en KJ/Kg')
54 disp('-La potencia neta (PN)esta dada en KW')
55 disp('-El consumo especifico del combustible (SFC)esta dado en Kg/KW.h')
56 disp('-La eficiencia termica (nth)esta dada en %')
57 Tabla_1 = table(rp',WN',PN',SFC',nth','VariableNames',
{'Rp','WN','PN','SFC','nth'});
58 disp(Tabla_1)
59
60 %
61 %Temperatura maxima 2
62 disp ('TEMPERA MAXIMA #2')
63 T3_1 = input('Digite la temperatura(K) maxima (T3):');
64 rpf = nlt*incr;
65 rp = (rpi:incr:rpf);
66 disp('La Temperatura 1 esta dada en Kelvin (K)')
67 disp('T1='),disp(T1)
68 disp('La Presion 1 esta dada en KPa')
69 disp('P1='),disp(P1)
70 T2_1 = T1*(1+1/nc*(rp.^gama-1));
71 P2_1 = rp*P1;
72 P3_1 = P2_1*pb;
73 disp('La Presion 4 esta dada en KPa')
74 P4_1 = P1;
75 disp('P4='),disp(P4_1)
76 T4_1 = T3_1*(1-nt*(1-((P4_1./P3_1).^gamg)));
77 disp('La Temperatura 5 esta dada en Kelvin (K)')
78 T5_1 = T3_1;
79 disp('T5='),disp(T5_1)
80 P5_1 = P3_1;
81 T6_1 = T5_1*(1-nt*(1-(1./rp.^gamg)));
82 disp('La Presion 6 esta dada en KPa')
83 P6_1 = P1;
84 disp('P6='),disp(P6_1)
85 disp('Las temperaturas estan dadas en kelvin (K) y las presiones estan dadas en
KPa')
86 Tabla_2=table(rp',T2_1',T4_1',T6_1',P2_1',P3_1',P5_1','VariableNames',
{'Rp','T2','T4','T6','P2','P3','P5'});
87 disp(Tabla_2)
88 Ta_1 = (T2_1+T1)./2;
89 Tg_1 = (T5_1+T6_1)./2;
90 Cpa_1 = ((1.0189*10.^3)-(0.13784*Ta_1)+((1.9843*10.^-4)*Ta_1.^2)+((4.2399*10.^-7)
*Ta_1.^3)-((3.7632*10.^-10)*Ta_1.^4))/1000;
91 Cpg_1 = (0.991615)+((6.99703*Tg_1)/(10.^5))+((2.7129*Tg_1.^2)/(10.^7))-((1.22442
*Tg_1.^3)/(10.^10));
92 disp('Los calores especificos del Aire (Cpa) y del Gas (Cpg) estan dados en kj/kg.
k')
93 Tabla_Cp_1 = table(rp',Cpa_1',Cpg_1','VariableNames',{'rp','Cpa','Cpg'});
94 disp(Tabla_Cp_1)
95 disp('Los flujos de masa estan dados en kg/s')

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo C. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_1.m Page 3  
 23 de abril de 2023 23:46:42

```

96 m1_1 = (Cpa_1./Cpg_1).*((T2_1-T1)./(T3_1-T4_1));
97 m2_1 = 1-m1_1;
98 Tabla_m_1 = table(rp',m1_1',m2_1','VariableNames',{'rp','m1','m2'});
99 disp(Tabla_m_1)
100 WN_1 = (Cpg_1.*(T5_1-T6_1)).*nm;
101 qs_1 = (((Cpg_1.*T3_1)-(Cpa_1.*T2_1)).*(m.*m1_1))+(((Cpg_1.*T5_1)-(Cpa_1.*T2_1)).*
(m.*m2_1));
102 PN_1 = (m.*m2_1).*WN_1;
103 nth_1 = (PN_1./qs_1)*100;
104 f_1 = ((Cpg_1.*(T3_1-298))-(Cpa_1.*(T2_1-298)))./(LHV-(Cpg_1.*(T3_1-298)));
105 SFC_1 = (3600.*(f_1).*(m))./PN_1;
106 disp('-El trabajo Neto (WN)esta dado en KJ/Kg')
107 disp('-La potencia neta (PN)esta dada en KW')
108 disp('-El consumo especifico del combustible (SFC)esta dado en Kg/KW.h')
109 disp('-La eficiencia termica (nth)esta dada en %')
110 Tabla_3 = table(rp',WN_1',PN_1',SFC_1',nth_1','VariableNames',
{'Rp','WN','PN','SFC','nth'});
111 disp(Tabla_3)
112
113 %
114 %Temperatura maxima 3
115 disp ('TEMPERA MAXIMA #3')
116 T3_2 = input('Digite la temperatura(K) maxima (T3):');
117 rpf = nlt*incr;
118 rp = (rpi:incr:rpf);
119 disp('La Temperatura 1 esta dada en Kelvin (K)')
120 disp('T1='),disp(T1)
121 disp('La Presion 1 esta dada en KPa')
122 disp('P1='),disp(P1)
123 T2_2 = T1*(1+1/nc*(rp.^gama-1));
124 P2_2 = rp*P1;
125 P3_2 = P2_2*pb;
126 disp('La Presion 4 esta dada en KPa')
127 P4_2 = P1;
128 disp('P4='),disp(P4_2)
129 T4_2 = T3_2*(1-nt*(1-((P4_2./P3_2).^gamg)));
130 disp('La Temperatura 5 esta dada en Kelvin (K)')
131 T5_2 = T3_2;
132 disp('T5='),disp(T5_2)
133 P5_2 = P3_2;
134 T6_2 = T5_2*(1-nt*(1-(1./rp.^gamg)));
135 disp('La Presion 6 esta dada en KPa')
136 P6_2 = P1;
137 disp('P6='),disp(P6_2)
138 disp('Las temperaturas estan dadas en kelvin (K) y las presiones estan dadas en
KPa')
139 Tabla_4 = table(rp',T2_2',T4_2',T6_2',P2_2',P3_2',P5_2','VariableNames',
{'Rp','T2','T4','T6','P2','P3','P5'});
140 disp(Tabla_4)
141 Ta_2 = (T2_2+T1)./2;
142 Tg_2 = (T5_2+T6_2)./2;
143 Cpa_2 = ((1.0189*10.^3)-(0.13784*Ta_2)+((1.9843*10.^-4)*Ta_2.^2)+((4.2399*10.^-7)
*Ta_2.^3)-((3.7632*10.^-10)*Ta_2.^4))/1000;

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo D. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_1.m Page 4  
 23 de abril de 2023 23:46:42

```

144 Cpg_2 = (0.991615) + ((6.99703 * Tg_2) / (10.^5)) + ((2.7129 * Tg_2.^2) / (10.^7)) - ((1.22442 * Tg_2.^3) / (10.^10));
145 disp('Los calores especificos del Aire (Cpa) y del Gas (Cpg) estan dados en kJ/kg.✓
k')
146 Tabla_Cp_2 = table(rp', Cpa_2', Cpg_2', 'VariableNames', {'rp', 'Cpa', 'Cpg'});
147 disp(Tabla_Cp_2)
148 disp('Los flujos de masa estan dados en kg/s')
149 m1_2 = (Cpa_2 / Cpg_2) .* ((T2_2 - T1) / (T3_2 - T4_2));
150 m2_2 = 1 - m1_2;
151 Tabla_m_2 = table(rp', m1_2', m2_2', 'VariableNames', {'rp', 'm1', 'm2'});
152 disp(Tabla_m_2)
153 WN_2 = (Cpg_2 .* (T5_2 - T6_2)) .* nm;
154 qs_2 = (((Cpg_2 .* T3_2) - (Cpa_2 .* T2_2)) .* (m .* m1_2)) + (((Cpg_2 .* T5_2) - (Cpa_2 .* T2_2)) .* (m .* m2_2));
155 PN_2 = (m .* m2_2) .* WN_2;
156 nth_2 = (PN_2 / qs_2) * 100;
157 f_2 = ((Cpg_2 .* (T3_2 - 298)) - (Cpa_2 .* (T2_2 - 298))) / (LHV - (Cpg_2 .* (T3_2 - 298)));
158 SFC_2 = (3600 .* (f_2) .* (m)) / PN_2;
159 disp('-El trabajo Neto (WN) esta dado en KJ/Kg')
160 disp('-La potencia neta (PN) esta dada en KW')
161 disp('-El consumo especifico del combustible (SFC) esta dado en Kg/KW.h')
162 disp('-La eficiencia termica (nth) esta dada en %')
163 Tabla_5 = table(rp', WN_2', PN_2', SFC_2', nth_2', 'VariableNames', {'Rp', 'WN', 'PN', 'SFC', 'nth'});
164 disp(Tabla_5)
165
166 %
167 %Temperatura maxima 4
168 disp('TEMPERA MAXIMA #4')
169 T3_3 = input('Digite la temperatura(K) maxima (T3):');
170 rpf = nlt * incr;
171 rp = (rpi : incr : rpf);
172 disp('La Temperatura 1 esta dada en Kelvin (K)')
173 disp('T1='), disp(T1)
174 disp('La Presion 1 esta dada en KPa')
175 disp('P1='), disp(P1)
176 T2_3 = T1 * (1 + 1/nc * (rp.^gamma - 1));
177 P2_3 = rp * P1;
178 P3_3 = P2_3 * pb;
179 disp('La Presion 4 esta dada en KPa')
180 P4_3 = P1;
181 disp('P4='), disp(P4_3)
182 T4_3 = T3_3 * (1 - nt * (1 - ((P4_3 / P3_3).^gamma)));
183 disp('La Temperatura 5 esta dada en Kelvin (K)')
184 T5_3 = T3_3;
185 disp('T5='), disp(T5_3)
186 P5_3 = P3_3;
187 T6_3 = T5_3 * (1 - nt * (1 - (1./rp.^gamma)));
188 disp('La Presion 6 esta dada en KPa')
189 P6_3 = P1;
190 disp('P6='), disp(P6_3)
191 disp('Las temperaturas estan dadas en kelvin (K) y las presiones estan dadas en
KPa')

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo E. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_1.m Page 5  
 23 de abril de 2023 23:46:42

```

192 Tabla_6 = table(rp',T2_3',T4_3',T6_3',P2_3',P3_3',P5_3', 'VariableNames',
{'Rp', 'T2', 'T4', 'T6', 'P2', 'P3', 'P5'});
193 disp(Tabla_6)
194 Ta_3 = (T2_3+T1)./2;
195 Tg_3 = (T5_3+T6_3)./2;
196 Cpa_3 = ((1.0189*10.^3)-(0.13784*Ta_3)+((1.9843*10.^-4)*Ta_3.^2)+((4.2399*10.^-7)
*Ta_3.^3)-(3.7632*10.^-10)*Ta_3.^4)/1000;
197 Cpg_3 = (0.991615)+((6.99703*Tg_3)/(10.^5))+((2.7129*Tg_3.^2)/(10.^7))-((1.22442
*Tg_3.^3)/(10.^10));
198 disp('Los calores especificos del Aire (Cpa) y del Gas (Cpg) estan dados en kJ/kg.
k')
199 Tabla_Cp_3 = table(rp',Cpa_3',Cpg_3', 'VariableNames', {'rp', 'Cpa', 'Cpg'});
200 disp(Tabla_Cp_3)
201 disp('Los flujos de masa estan dados en kg/s')
202 m1_3 = (Cpa_3./Cpg_3).*((T2_3-T1)/(T3_3-T4_3));
203 m2_3 = 1-m1_3;
204 Tabla_m_3 = table(rp',m1_3',m2_3', 'VariableNames', {'rp', 'm1', 'm2'});
205 disp(Tabla_m_3)
206 WN_3 = (Cpg_3.*(T5_3-T6_3)).*nm;
207 qs_3 = (((Cpg_3.*T3_3)-(Cpa_3.*T2_3)).*(m.*m1_3))+(((Cpg_3.*T5_3)-(Cpa_3.*T2_3)).
*(m.*m2_3));
208 PN_3 = (m.*m2_3).*WN_3;
209 nth_3 = (PN_3./qs_3)*100;
210 f_3 = ((Cpg_3.*(T3_3-298)-(Cpa_3.*(T2_3-298)))/(LHV-(Cpg_3.*(T3_3-298)));
211 SFC_3 = (3600.*(f_3).*(m))./PN_3;
212 disp('-El trabajo Neto (WN)esta dado en KJ/Kg')
213 disp('-La potencia neta (PN)esta dada en KW')
214 disp('-El consumo especifico del combustible (SFC)esta dado en Kg/KW.h')
215 disp('-La eficiencia termica (nth)esta dada en %')
216 Tabla_7 = table(rp',WN_3',PN_3',SFC_3',nth_3', 'VariableNames',
{'Rp', 'WN', 'PN', 'SFC', 'nth'});
217 disp(Tabla_7)
218
219 %%
220 %Grafica 1
221 plot(rp,WN,'b','LineWidth',2.5,'Marker','o');
222 hold on;
223 plot(rp,WN_1,'r','LineWidth',2.5,'Marker','o');
224 hold on;
225 plot(rp,WN_2,'g','LineWidth',2.5,'Marker','o');
226 hold on;
227 plot(rp,WN_3,'k','LineWidth',2.5,'Marker','o');
228
229 % Create title
230 title({'TRABAJO NETO VS R'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...
'FontName', 'Times New Roman');
231
232
233 % Create xlabel
234 xlabel({'RELACION DE PRESIONES, R'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...
'FontName', 'Times New Roman');
235
236
237 % Create ylabel
238 ylabel({'TRABAJO NETO (KJ/Kg)'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo F. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_1.m  
23 de abril de 2023

Page 6  
23:46:42

```

239     'FontName','Times New Roman');
240
241 % leyenda
242 legend('1200K','1300K','1400K','1500K','fontSize',↵
14,'FontWeight','bold','Location','best');
243
244 %%
245 %Grafica 2
246 plot(rp,PN,'b','LineWidth',2.5,'Marker','o');
247 hold on;
248 plot(rp,PN_1,'r','LineWidth',2.5,'Marker','o');
249 hold on;
250 plot(rp,PN_2,'g','LineWidth',2.5,'Marker','o');
251 hold on;
252 plot(rp,PN_3,'k','LineWidth',2.5,'Marker','o');
253
254 % Create title
255 title({'POTENCIA VS R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
256     'FontName','Times New Roman');
257
258 % Create xlabel
259 xlabel({'RELACION DE PRESIONES, R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
260     'FontName','Times New Roman');
261
262 % Create ylabel
263 ylabel({'POTENCIA (KW)'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
264     'FontName','Times New Roman');
265
266 % leyenda
267 legend('1200K','1300K','1400K','1500K','fontSize',↵
14,'FontWeight','bold','Location','best');
268
269 %%
270 %Grafica 3
271 plot(rp,SFC,'b','LineWidth',2.5,'Marker','o');
272 hold on;
273 plot(rp,SFC_1,'r','LineWidth',2.5,'Marker','o');
274 hold on;
275 plot(rp,SFC_2,'g','LineWidth',2.5,'Marker','o');
276 hold on;
277 plot(rp,SFC_3,'k','LineWidth',2.5,'Marker','o');
278
279 % Create title
280 title({'SFC VS R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
281     'FontName','Times New Roman');
282
283 % Create xlabel
284 xlabel({'RELACION DE PRESIONES, R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
285     'FontName','Times New Roman');
286
287 % Create ylabel
288 ylabel({'SFC (Kg/KW-h)'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
289     'FontName','Times New Roman');
```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo G. Códigos de programación para la cámara de combustión primaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_1.m  
 23 de abril de 2023

Page 7  
 23:46:42

```

290
291 % leyenda
292 legend('1200K', '1300K', '1400K', '1500K', 'fontsize', ↵
14, 'FontWeight', 'bold', 'Location', 'best');
293
294 %%
295 %Grafica 4
296 plot(rp,nth, 'b', 'LineWidth', 2.5, 'Marker', 'o');
297 hold on;
298 plot(rp,nth_1, 'r', 'LineWidth', 2.5, 'Marker', 'o');
299 hold on;
300 plot(rp,nth_2, 'g', 'LineWidth', 2.5, 'Marker', 'o');
301 hold on;
302 plot(rp,nth_3, 'K', 'LineWidth', 2.5, 'Marker', 'o');
303
304 % Create title
305 title({'EFICIENCIA VS R'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...
306       'FontName', 'Times New Roman');
307
308 % Create xlabel
309 xlabel({'RELACION DE PRESIONES, R'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...
310       'FontName', 'Times New Roman');
311
312 % Create ylabel
313 ylabel({'EFICIENCIA %'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...
314       'FontName', 'Times New Roman');
315
316 % leyenda
317 legend('1200K', '1300K', '1400K', '1500K', 'fontsize', ↵
14, 'FontWeight', 'bold', 'Location', 'best');
318
319

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexos del programa variando la segunda cámara de combustión

### Anexo H. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_2.m Page 1  
 24 de abril de 2023 0:00:36

```

1 clc;
2 load('Constantes.mat');
3
4 %Procedimiento de problema
5
6 %Temperatura maxima 1
7 disp('TEMPERA MAXIMA #1')
8 m = input('Digite el flujo de masa(Kg/s):');
9 T1 = input('Digite la temperatura(K) de entrada (T1):');
10 P1 = input('Digite la presion(KPa) de entrada (P1):');
11 T3 = input('Digite la temperatura(K) maxima de la primera camara de combustión
(T3):');
12 T5 = input('Digite la temperatura(K) maxima de la segunda camara de combustión
(T5):');
13 rpi = input('Digite la relacion de presion:');
14 incr = input('Especificar el incremento entre lineas:');
15 nlt = input('Especificar el número de lineas:');
16 rpf = nlt*incr;
17 rp = (rpi:incr:rpf);
18 T2 = T1*(1+1/nc*(rp.^gama-1));
19 P2 = rp*P1;
20 P3 = P2*pb;
21 disp('La Presion 4 esta dada en KPa')
22 P4 = P1;
23 disp('P4='),disp(P4)
24 T4 = T3*(1-nt*(1-((P4./P3).^gamg)));
25 P5 = P3;
26 T6 = T5*(1-nt*(1-(1./rp).^gamg));
27 disp('La Presion 6 esta dada en KPa')
28 P6 = P1;
29 disp('P6='),disp(P6)
30 disp('Las temperaturas estan dadas en kelvin (K) y las presiones estan dadas en
KPa')
31 Tabla = table(rp',T2',T4',T6',P2',P3',P5','VariableNames',
{'Rp','T2','T4','T6','P2','P3','P5'});
32 disp(Tabla)
33 Ta = (T2+T1)./2;
34 Tg = (T5+T6)./2;
35 Cpa = ((1.0189*10.^3)-(0.13784*Ta)+((1.9843*10.^-4)*Ta.^2)+((4.2399*10.^-7)*Ta.^3)
-((3.7632*10.^-10)*Ta.^4))/1000;
36 Cpg = (0.991615)+((6.99703*Tg)./(10.^5))+((2.7129*Tg.^2)./(10.^7))-((1.22442*Tg.
^3)./(10.^10));
37 disp('Los calores especificos del Aire (Cpa) y del Gas (Cpg) estan dados en kj/kg.
k')
38 Tabla_Cp = table(rp',Cpa',Cpg','VariableNames',{'rp','Cpa','Cpg'});
39 disp(Tabla_Cp)
40 disp('Los flujos de masa estan dados en kg/s')
41 m1 = (Cpa./Cpg).*((T2-T1)./(T3-T4));
42 m2 = 1-m1;
43 Tabla_m = table(rp',m1',m2','VariableNames',{'rp','m1','m2'});
44 disp(Tabla_m)
45 WN = (Cpg.*(T5-T6)).*nm;
46 qs = (((Cpg.*T3)-(Cpa.*T2)).*(m.*m1))+(((Cpg.*T5)-(Cpa.*T2)).*(m.*m2));

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo I. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_2.m

Page 2

24 de abril de 2023

0:00:36

```

47 PN = (m.*m2).*WN;
48 nth = (PN./qs)*100;
49 f = ((Cpg.*(T3-298))-(Cpa.*(T2-298)))/(LHV-(Cpg.*(T3-298)));
50 SFC = (3600.*(f).*(m))./PN;
51 disp('-El trabajo Neto (WN)esta dado en KJ/Kg')
52 disp('-La potencia neta (PN)esta dada en KW')
53 disp('-El consumo especifico del combustible (SFC)esta dado en Kg/KW.h')
54 disp('-La eficiencia termica (nth)esta dada en %')
55 Tabla_1 = table(rp',WN',PN',SFC',nth','VariableNames',
{'Rp','WN','PN','SFC','nth'});
56 disp(Tabla_1)
57
58 %
59 %Temperatura maxima 2
60 disp ('TEMPERA MAXIMA #2')
61 T5_1 = input('Digite la temperatura(K) maxima de la segunda camara de combustión
(T5:');
62 rpf = nlt*incr;
63 rp = (rpi:incr:rpf);
64 disp('La Temperatura 1 esta dada en Kelvin (K)')
65 disp('T1='),disp(T1)
66 disp('La Presion 1 esta dada en KPa')
67 disp('P1='),disp(P1)
68 T2_1 = T1*(1+1/nc*(rp.^gama-1));
69 disp('La Temperatura 3 esta dada en Kelvin (K)')
70 disp('T3='),disp(T3)
71 P2_1 = rp*P1;
72 P3_1 = P2_1*pb;
73 disp('La Presion 4 esta dada en KPa')
74 P4_1 = P1;
75 disp('P4='),disp(P4_1)
76 T4_1 = T3*(1-nt*(1-((P4_1./P3_1).^gamg)));
77 P5_1 = P3_1;
78 T6_1 = T5_1*(1-nt*(1-(1./rp.^gamg)));
79 disp('La Presion 6 esta dada en KPa')
80 P6_1 = P1;
81 disp('P6='),disp(P6_1)
82 disp('Las temperaturas estan dadas en kelvin (K) y las presiones estan dadas en
KPa')
83 Tabla_2=table(rp',T2_1',T4_1',T6_1',P2_1',P3_1',P5_1','VariableNames',
{'Rp','T2','T4','T6','P2','P3','P5'});
84 disp(Tabla_2)
85 Ta_1 = (T2_1+T1)./2;
86 Tg_1 = (T5_1+T6_1)./2;
87 Cpa_1 = ((1.0189*10.^3)-(0.13784*Ta_1)+((1.9843*10.^-4)*Ta_1.^2)+((4.2399*10.^-7)
*Ta_1.^3)-((3.7632*10.^-10)*Ta_1.^4))/1000;
88 Cpg_1 = (0.991615)+((6.99703*Tg_1)/(10.^5))+((2.7129*Tg_1.^2)/(10.^7))-((1.22442
*Tg_1.^3)/(10.^10));
89 disp('Los calores especificos del Aire (Cpa) y del Gas (Cpg) estan dados en kj/kg.
k')
90 Tabla_Cp_1 = table(rp',Cpa_1',Cpg_1','VariableNames',{'rp','Cpa','Cpg'});
91 disp(Tabla_Cp_1)
92 disp('Los flujos de masa estan dados en kg/s')

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo J. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_2.m Page 3  
 24 de abril de 2023 0:00:36

```

93 m1_1 = (Cpa_1./Cpg_1).*((T2_1-T1)./(T3-T4_1));
94 m2_1 = 1-m1_1;
95 Tabla_m_1 = table(rp',m1_1',m2_1','VariableNames',{'rp','m1','m2'});
96 disp(Tabla_m_1)
97 WN_1 = (Cpg_1.*(T5_1-T6_1)).*nm;
98 qs_1 = (((Cpg_1.*T3)-(Cpa_1.*T2_1)).*(m.*m1_1))+(((Cpg_1.*T5_1)-(Cpa_1.*T2_1)).*
(m.*m2_1));
99 PN_1 = (m.*m2_1).*WN_1;
100 nth_1 = (PN_1./qs_1)*100;
101 f_1 = ((Cpg_1.*(T3-298)-(Cpa_1.*(T2_1-298)))./(LHV-(Cpg_1.*(T3-298)));
102 SFC_1 = (3600.*(f_1).*(m))./PN_1;
103 disp('-El trabajo Neto (WN)esta dado en KJ/Kg')
104 disp('-La potencia neta (PN)esta dada en KW')
105 disp('-El consumo especifico del combustible (SFC)esta dado en Kg/KW.h')
106 disp('-La eficiencia termica (nth)esta dada en %')
107 Tabla_3 = table(rp',WN_1',PN_1',SFC_1',nth_1','VariableNames',
{'Rp','WN','PN','SFC','nth'});
108 disp(Tabla_3)
109
110 %
111 %Temperatura maxima 3
112 disp ('TEMPERA MAXIMA #3')
113 T5_2 = input('Digite la temperatura(K) maxima de la segunda camara de combustión
(T5):');
114 rpf = nlt*incr;
115 rp = (rpi:incr:rpf);
116 disp('La Temperatura 1 esta dada en Kelvin (K)')
117 disp('T1='),disp(T1)
118 disp('La Presion 1 esta dada en KPa')
119 disp('P1='),disp(P1)
120 T2_2 = T1*(1+1/nc*(rp.^gama-1));
121 disp('La Temperatura 3 esta dada en Kelvin (K)')
122 disp('T3='),disp(T3)
123 P2_2 = rp*P1;
124 P3_2 = P2_2*pb;
125 disp('La Presion 4 esta dada en KPa')
126 P4_2 = P1;
127 disp('P4='),disp(P4_2)
128 T4_2 = T3*(1-nt*(1-((P4_2./P3_2).^gamg)));
129 P5_2 = P3_2;
130 T6_2 = T5_2*(1-nt*(1-(1./rp.^gamg)));
131 disp('La Presion 6 esta dada en KPa')
132 P6_2 = P1;
133 disp('P6='),disp(P6_2)
134 disp('Las temperaturas estan dadas en kelvin (K) y las presiones estan dadas en
KPa')
135 Tabla_4 = table(rp',T2_2',T4_2',T6_2',P2_2',P3_2',P5_2','VariableNames',
{'Rp','T2','T4','T6','P2','P3','P5'});
136 disp(Tabla_4)
137 Ta_2 = (T2_2+T1)./2;
138 Tg_2 = (T5_2+T6_2)./2;
139 Cpa_2 = ((1.0189*10.^3)-(0.13784*Ta_2)+((1.9843*10.^-4)*Ta_2.^2)+((4.2399*10.^-7)
*Ta_2.^3)-((3.7632*10.^-10)*Ta_2.^4))/1000;

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo K. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_2.m Page 4  
 24 de abril de 2023 0:00:36

```

140 Cp_g_2 = (0.991615) + ((6.99703*Tg_2)/(10.^5)) + ((2.7129*Tg_2.^2)/(10.^7)) - ((1.22442*
*Tg_2.^3)/(10.^10));
141 disp('Los calores especificos del Aire (Cpa) y del Gas (Cpg) estan dados en kj/kg.
k')
142 Tabla_Cp_2 = table(rp',Cpa_2',Cpg_2', 'VariableNames',{'rp','Cpa','Cpg'});
143 disp(Tabla_Cp_2)
144 disp('Los flujos de masa estan dados en kg/s')
145 m1_2 = (Cpa_2./Cpg_2).*((T2_2-T1)./(T3-T4_2));
146 m2_2 = 1-m1_2;
147 Tabla_m_2 = table(rp',m1_2',m2_2', 'VariableNames',{'rp','m1','m2'});
148 disp(Tabla_m_2)
149 WN_2 = (Cpg_2.*(T5_2-T6_2)).*nm;
150 qs_2 = (((Cpg_2.*T3)-(Cpa_2.*T2_2)).*(m.*m1_2)) + (((Cpg_2.*T5_2)-(Cpa_2.*T2_2)).*(
m.*m2_2));
151 PN_2 = (m.*m2_2).*WN_2;
152 nth_2 = (PN_2./qs_2)*100;
153 f_2 = ((Cpg_2.*(T3-298))-(Cpa_2.*(T2_2-298)))./(LHV-(Cpg_2.*(T3-298)));
154 SFC_2 = (3600.*(f_2).*(m))./PN_2;
155 disp('-El trabajo Neto (WN) esta dado en KJ/Kg')
156 disp('-La potencia neta (PN) esta dada en KW')
157 disp('-El consumo especifico del combustible (SFC) esta dado en Kg/KW.h')
158 disp('-La eficiencia termica (nth) esta dada en %')
159 Tabla_5 = table(rp',WN_2',PN_2',SFC_2',nth_2', 'VariableNames',{'
Rp','WN','PN','SFC','nth'});
160 disp(Tabla_5)
161
162 %
163 %Temperatura maxima 4
164 disp('TEMPERA MAXIMA #4')
165 T5_3 = input('Digite la temperatura(K) maxima de la segunda camara de combustión
(T5):');
166 rpf = nlt*incr;
167 rp = (rpi:incr:rpf);
168 disp('La Temperatura 1 esta dada en Kelvin (K)')
169 disp('T1='), disp(T1)
170 disp('La Presion 1 esta dada en KPa')
171 disp('P1='), disp(P1)
172 T2_3 = T1*(1+1/nc*(rp.^gama-1));
173 disp('La Temperatura 3 esta dada en Kelvin (K)')
174 disp('T3='), disp(T3)
175 P2_3 = rp*P1;
176 P3_3 = P2_3*pb;
177 disp('La Presion 4 esta dada en KPa')
178 P4_3 = P1;
179 disp('P4='), disp(P4_3)
180 T4_3 = T3*(1-nt*(1-((P4_3./P3_3).^gamg)));
181 P5_3 = P3_3;
182 T6_3 = T5_3*(1-nt*(1-(1./rp.^gamg)));
183 disp('La Presion 6 esta dada en KPa')
184 P6_3 = P1;
185 disp('P6='), disp(P6_3)
186 disp('Las temperaturas estan dadas en kelvin (K) y las presiones estan dadas en
KPa')

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo L. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_2.m Page 5  
 24 de abril de 2023 0:00:36

```

187 Tabla_6 = table(rp',T2_3',T4_3',T6_3',P2_3',P3_3',P5_3', 'VariableNames',
{'Rp', 'T2', 'T4', 'T6', 'P2', 'P3', 'P5'});
188 disp(Tabla_6)
189 Ta_3 = (T2_3+T1)./2;
190 Tg_3 = (T5_3+T6_3)./2;
191 Cpa_3 = ((1.0189*10.^3)-(0.13784*Ta_3)+((1.9843*10.^-4)*Ta_3.^2)+((4.2399*10.^-7)
*Ta_3.^3)-((3.7632*10.^-10)*Ta_3.^4))/1000;
192 Cpg_3 = (0.991615)+((6.99703*Tg_3)/(10.^5))+((2.7129*Tg_3.^2)/(10.^7))-((1.22442
*Tg_3.^3)/(10.^10));
193 disp('Los calores especificos del Aire (Cpa) y del Gas (Cpg) estan dados en kj/kg.
k')
194 Tabla_Cp_3 = table(rp',Cpa_3',Cpg_3', 'VariableNames', {'rp', 'Cpa', 'Cpg'});
195 disp(Tabla_Cp_3)
196 disp('Los flujos de masa estan dados en kg/s')
197 m1_3 = (Cpa_3./Cpg_3).*(T2_3-T1)/(T3-T4_3);
198 m2_3 = 1-m1_3;
199 Tabla_m_3 = table(rp',m1_3',m2_3', 'VariableNames', {'rp', 'm1', 'm2'});
200 disp(Tabla_m_3)
201 WN_3 = (Cpg_3.*(T5_3-T6_3)).*nm;
202 qs_3 = (((Cpg_3.*T3)-(Cpa_3.*T2_3)).*(m.*m1_3))+(((Cpg_3.*T5_3)-(Cpa_3.*T2_3)).*
(m.*m2_3));
203 PN_3 = (m.*m2_3).*WN_3;
204 nth_3 = (PN_3./qs_3)*100;
205 f_3 = ((Cpg_3.*(T3-298))-(Cpa_3.*(T2_3-298)))/(LHV-(Cpg_3.*(T3-298)));
206 SFC_3 = (3600.*(f_3).*(m))./PN_3;
207 disp('-El trabajo Neto (WN)esta dado en KJ/Kg')
208 disp('-La potencia neta (PN)esta dada en KW')
209 disp('-El consumo especifico del combustible (SFC)esta dado en Kg/KW.h')
210 disp('-La eficiencia termica (nth)esta dada en %')
211 Tabla_7 = table(rp',WN_3',PN_3',SFC_3',nth_3', 'VariableNames',
{'Rp', 'WN', 'PN', 'SFC', 'nth'});
212 disp(Tabla_7)
213
214 %%
215 %Grafica 1
216 plot(rp,WN, 'b', 'LineWidth', 2.5, 'Marker', 'o');
217 hold on;
218 plot(rp,WN_1, 'r', 'LineWidth', 2.5, 'Marker', 'o');
219 hold on;
220 plot(rp,WN_2, 'g', 'LineWidth', 2.5, 'Marker', 'o');
221 hold on;
222 plot(rp,WN_3, 'k', 'LineWidth', 2.5, 'Marker', 'o');
223
224 % Create title
225 title({'TRABAJO NETO VS R'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...
226       'FontName', 'Times New Roman');
227
228 % Create xlabel
229 xlabel({'RELACION DE PRESIONES, R'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...
230       'FontName', 'Times New Roman');
231
232 % Create ylabel
233 ylabel({'TRABAJO NETO (KJ/Kg)'}, 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, ...

```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo M. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_2.m Page 6  
 24 de abril de 2023 0:00:36

```

234     'FontName','Times New Roman');
235
236 % leyenda
237 legend('1300K','1400K','1500K','1600K','fontsize',↵
14,'FontWeight','bold','Location','best');
238
239 %%
240 %Grafica 2
241 plot(rp,PN,'b','LineWidth',2.5,'Marker','o');
242 hold on;
243 plot(rp,PN_1,'r','LineWidth',2.5,'Marker','o');
244 hold on;
245 plot(rp,PN_2,'g','LineWidth',2.5,'Marker','o');
246 hold on;
247 plot(rp,PN_3,'k','LineWidth',2.5,'Marker','o');
248
249 % Create title
250 title({'POTENCIA VS R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
251     'FontName','Times New Roman');
252
253 % Create xlabel
254 xlabel({'RELACION DE PRESIONES, R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
255     'FontName','Times New Roman');
256
257 % Create ylabel
258 ylabel({'POTENCIA (KW)'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
259     'FontName','Times New Roman');
260
261 % leyenda
262 legend('1300K','1400K','1500K','1600K','fontsize',↵
14,'FontWeight','bold','Location','best');
263
264 %%
265 %Grafica 3
266 plot(rp,SFC,'b','LineWidth',2.5,'Marker','o');
267 hold on;
268 plot(rp,SFC_1,'r','LineWidth',2.5,'Marker','o');
269 hold on;
270 plot(rp,SFC_2,'g','LineWidth',2.5,'Marker','o');
271 hold on;
272 plot(rp,SFC_3,'k','LineWidth',2.5,'Marker','o');
273
274 % Create title
275 title({'SFC VS R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
276     'FontName','Times New Roman');
277
278 % Create xlabel
279 xlabel({'RELACION DE PRESIONES, R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
280     'FontName','Times New Roman');
281
282 % Create ylabel
283 ylabel({'SFC (Kg/KW-h)'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
284     'FontName','Times New Roman');
```

Nota. Elaborado por autores.

## Anexo N. Códigos de programación para la cámara de combustión secundaria.

C:\Users\usuario\Documents\MATLAB\Programa\CASO\_2.m  
 24 de abril de 2023

Page 7  
 0:00:36

```

285
286 % leyenda
287 legend('1300K','1400K','1500K','1600K','fontsize',↵
14,'FontWeight','bold','Location','best');
288
289 %%
290 %Grafica 4
291 plot(rp,nth,'b','LineWidth',2.5,'Marker','o');
292 hold on;
293 plot(rp,nth_1,'r','LineWidth',2.5,'Marker','o');
294 hold on;
295 plot(rp,nth_2,'g','LineWidth',2.5,'Marker','o');
296 hold on;
297 plot(rp,nth_3,'k','LineWidth',2.5,'Marker','o');
298
299 % Create title
300 title({'EFICIENCIA VS R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
301       'FontName','Times New Roman');
302
303 % Create xlabel
304 xlabel({'RELACION DE PRESIONES, R'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
305       'FontName','Times New Roman');
306
307 % Create ylabel
308 ylabel({'EFICIENCIA %'},'FontWeight','bold','FontSize',12,...
309       'FontName','Times New Roman');
310
311 % leyenda
312 legend('1300K','1400K','1500K','1600K','fontsize',↵
14,'FontWeight','bold','Location','best');
313
314

```

Nota. Elaborado por autores.