

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS INTERACTIVOS DE LOS
CICLOS DE POTENCIA OTTO Y DIESEL**

**Componente: DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS
INTERACTIVOS DEL CICLO DE POTENCIA OTTO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

BRAYAN NICOLÁS NOLE SUÁREZ

brayan.nole@epn.edu.ec

DIRECTOR: MIGUEL DARÍO ORTEGA LÓPEZ

miguel.ortega@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2022

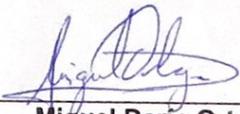
CERTIFICACIONES

Yo, Brayan Nicolás Nole Suárez declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Brayan Nicolás Nole Suárez

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Brayan Nicolás Nole Suárez, bajo mi supervisión.



Miguel Darío Ortega López

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Brayan Nicolás Nole Suárez

Miguel Darío Ortega López

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres, a mi familia y a mi persona, ya que gracias a su apoyo y a mi perseverancia he logrado cumplir una meta más en mi vida. Y también va dedicado a todas esas personas que me apoyaron durante esta travesía realizada, ya que gracias a ese apoyo incondicional logré sobrellevar ciertos inconvenientes.

AGRADECIMIENTO

Primero que nada, quiero agradecer a Dios por haberme otorgado una gran familia, la cual me ha apoyado en todo momento durante esta travesía, gracias a mi madre Nancy por brindarme todo su amor y apoyo en mi vida profesional y personal, gracias a mis tíos quienes confiaron en mí y estuvieron apoyándome en todo momento. También quiero agradecer a mi director de trabajo de integración curricular Ing. Miguel Ortega por su guía y acompañamiento y a mi compañero Anthony Encalada, quienes me ayudaron en diversos problemas presentados durante el transcurso de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
Ciclo termodinámico.....	3
Ciclo Otto	3
Balance energético (E) en un sistema cerrado	5
Balance de entropía (S) en un sistema cerrado.....	6
Balance exergético (X) en un sistema cerrado	6
Python.....	8
Tkinter	8
Métodos de resolución	8
2 METODOLOGÍA.....	12
2.1 Programación numérica en Python.....	14
2.2 Validación de resultados numéricos.....	17
2.3 Programación gráfica con Tkinter	19
2.4 Interpretación gráfica de los diagramas	21
2.5 Programación de la interfaz de usuario con Tkinter	24
2.6 Obtención de ejecutable	27
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
3.1 Resultados.....	29
Diagrama de energía (Método exacto).....	29
Diagrama de entropía (Método exacto).....	31
Diagrama de exergía (Método exacto).....	33
Diagrama de energía (Método aproximado)	34

Análisis de sensibilidad para la temperatura máxima (T_3)	36
Análisis de sensibilidad para la relación de compresión (r).....	39
Análisis de sensibilidad para la temperatura máxima (T_3) y la relación de compresión (r)	42
3.2 Conclusiones	44
3.3 Recomendaciones	47
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
5 ANEXOS.....	49
ANEXO I. Programa realizado para diagrama de energía por el método exacto.....	49
ANEXO II. Programa realizado para diagrama de entropía por el método exacto.....	50
ANEXO III. Programa realizado para diagrama de exergía por el método exacto	51
ANEXO IV. Programa realizado para diagrama de energía por el método aproximado	52
ANEXO V. Manual de usuario.....	53
5.1 Pantalla principal	54
5.2 Variables de entrada.....	55
5.3 Consideraciones para la resolución del ciclo	55
5.4 Uso del software	55
5.5 Botón “Acerca de DT-Otto”:	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama termodinámico p-v del ciclo Otto [2]	3
Figura 1.2 Esquema del cilindro pistón en el ciclo Otto [2]	4
Figura 1.3 Relación de compresión del motor a gasolina [2]	4
Figura 2.1 Metodología a utilizar	13
Figura 2.2 IDLE Python.....	14
Figura 2.3 Importación de librerías.....	15
Figura 2.4 Ingreso de datos como números flotantes.....	16
Figura 2.5 Cálculo de las propiedades del estado termodinámico 1	16
Figura 2.6 Problema realizado en TermoGraf.	19
Figura 2.7 Creación de gráfica base	19
Figura 2.8 Representación de gráfica desarrollada en la interfaz	20
Figura 2.9 Ecuaciones utilizadas para la gráfica de energía en el cuarto cuadrante.	20
Figura 2.10 Imagen base para representación gráfica	21
Figura 2.11 Gráfica de energía mediante el método exacto	22
Figura 2.12 Representación gráfica de la entropía.....	23
Figura 2.13 Representación gráfica de la exergía	24
Figura 2.14 Creación de la ventana para la interfaz	25
Figura 2.15 Creación de "frames" para ingreso y salida de datos	25
Figura 2.16 Creación de "frame" y widgets dentro de un contenedor	25
Figura 2.17 Creación de botones y enlace con programación numérica para botón "RESET" ..	26
Figura 2.18 Contenedor del estado dos con variable de salida de la presión	26
Figura 2.19 Empaquetar imágenes en archivo .exe	27
Figura 2.20 Empaquetamiento de imagen del diagrama P-V	27
Figura 2.21 Consola para creación de ejecutable	28
Figura 3.1 Diagrama de energía del ciclo Otto por el método exacto	30
Figura 3.2 Diagrama de entropía del ciclo Otto por el método exacto	32
Figura 3.3 Diagrama de exergía del ciclo Otto por el método exacto	33
Figura 3.4 Diagrama de energía del ciclo Otto por el método aproximado	35
Figura 3.5 Comparación de energía para variación en T_3	37
Figura 3.6 Comparación de entropía para variación en T_3	38
Figura 3.7 Comparación de exergía para variación en T_3	38
Figura 3.8 Comparación de energía para variación de relación de compresión	40
Figura 3.9 Comparación de entropía para variación de relación de compresión	41
Figura 3.10 Comparación de exergía para variación de relación de compresión.....	42
Figura 5.1 Pantalla principal del software.....	54
Figura 5.2 Botones para mostrar los diagramas correspondientes.....	56
Figura 5.3 Interfaz mostrada para el diagrama de energía por el método exacto	57
Figura 5.4 Interfaz mostrada para el diagrama de entropía por el método exacto	57
Figura 5.5 Interfaz mostrada para el diagrama de exergía por el método exacto	58
Figura 5.6 Interfaz mostrada para el diagrama de energía por el método aproximado	58
Figura 5.7 Información mostrada por el botón "Acerca de DT_Otto	59

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza un módulo adicional para el software de diagramas interactivos (DT-Otto) mediante programación Python, el cual permite representar numérica y gráficamente el ciclo Otto a través de los diagramas de energía, entropía y exergía por los métodos exacto y aproximado. El software requiere del ingreso de variables típicas de entrada para sistemas termodinámicos simples, asociados al ciclo Otto como la presión y la temperatura en el estado inicial, la temperatura máxima y la relación de compresión del ciclo, así como las variables de presión atmosférica y temperatura ambiente para el cálculo de la exergía. Tomando en cuenta las consideraciones de la termodinámica clásica para la resolución numérica, y, a la mezcla aire-combustible como fluido de trabajo. Con ello, se obtiene resultados numéricos de las propiedades de cada uno de los estados termodinámicos, así como parámetros propios del ciclo, y, los diagramas de energía, exergía y entropía por los métodos de resolución mencionados. La interactividad con la que se desarrolla el programa permite al usuario el cambio de cualquier parámetro en las variables de entrada, posibilitando así, realizar comparaciones visuales de cómo afecta la modificación de uno o más parámetros y observar la sensibilidad con la que alteran al diagrama seleccionado. Se realiza una comparación de los resultados obtenidos, con el fin de conseguir un error relativo entre el programa, el método analítico, Cengel y el programa TermoGraf, y, de esta manera se demuestra la precisión y confiabilidad de los resultados arrojados por el software.

PALABRAS CLAVE: Diagramas, software, interactividad, confiabilidad.

ABSTRACT

In this project, a new module for the interactive diagram software (DT-Otto) is developed using Python programming, allowing the Otto cycle to be precisely and accurately portrayed mathematically and graphically employing the energy, entropy, and exergy diagrams. approximate. The software demands the input of standard input variables for straightforward thermodynamic systems connected to the Otto cycle, such as initial pressure and temperature, cycle maximum temperature and compression ratio, as well as variables for atmospheric pressure and temperature. environment in which to estimate energy. employing the air-fuel mixture as the working fluid whilst considering the numerical resolution demands of classical thermodynamics. With this, the cycle's own parameters, the energy, exergy, and entropy diagrams, as well as the attributes of each of the thermodynamic states, may be numerically calculated using the resolution techniques. The program's interactivity enables the user to modify any parameter in the input variables, allowing visual comparisons of how updating one or more parameters impacts and monitors the sensitivity with which they change the specified diagram. The accuracy and reliability of the result obtained by the software are illustrated by a comparison of the results generated to establish the relative error between the program, the analytical method, Cengel, and the TermoGraf program.

KEYWORDS: Diagrams, software, interactivity, reliability.

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo de potencia Otto trabaja en un sistema cerrado y es utilizado para el análisis de máquinas recíprocas de encendido por chispa [2]. Este ciclo consta de cuatro procesos (compresión, entrada de calor, expansión y salida de calor), donde los procesos de compresión y expansión se consideran adiabáticos y reversibles, es decir, isentrópicos, mientras que los procesos de adición y rechazo de calor se dan a volumen constante [2,6]. El análisis se llevará a cabo con las suposiciones de aire estándar (gas ideal), es decir, se considera a la mezcla de aire combustible como aire gas ideal, en este caso la sustancia de trabajo. Además, no se toma en cuenta los cambios de energía cinética y potencial. Al ser un sistema cerrado, la masa es constante, por lo que el balance de energía se expresa por unidad de masa [2].

En la búsqueda de literatura relativa a representaciones gráficas de ciclos termodinámicos, autores previos como García [1] han implementado un software mediante programación Python, para la resolución de problemas termodinámicos del ciclo Otto. Sin embargo, no se analiza el comportamiento de energía, exergía y entropía del ciclo y por consiguiente cómo se afecta a estos parámetros. Además, con este trabajo previo se puede evidenciar el manejo de Python [11] como una herramienta de fácil interacción para la creación de un software que permita el desarrollo tanto numérico como gráfico del ciclo a analizar. Las interfaces gráficas en este tipo de software se desarrollan de manera óptima mediante el paquete Tkinter, el cual es una librería que proporciona a las aplicaciones de Python una interfaz de usuario fácil de programar [7]. Otros análisis presentados por Gómez [9], Rivera [10] y Rodríguez [8] abarcan estudios numéricos sobre el análisis energético, exergético y de entropía del ciclo Otto, centrando este análisis en la parte numérica de los temas mencionados, mas no, en la parte gráfica.

En el presente documento se propone el desarrollo de un software que trabaje con variables de entrada típicas de sistemas termodinámicos simples, asociados al ciclo Otto. Estas variables pueden ser la presión y la temperatura en el estado inicial (estado uno), temperatura máxima (estado tres) y la relación de compresión del ciclo, donde el usuario podrá ingresar dichas variables. En base a estos datos de entrada, se desarrollará la programación básica del ciclo Otto mediante el software Python por los métodos aproximado y exacto. Cabe indicar que para el análisis de exergía se requiere la temperatura ambiente y la presión atmosférica. Posteriormente, se desarrollará la programación de los ciclos interactivos a obtener, considerando los resultados numéricos previos.

Se deberá obtener los tres diagramas (energía, exergía y entropía), los mismos que deberán estar representados de forma adecuada y consistente con los resultados

numéricos en cada estado termodinámico. Al tiempo de implementar cualquier modificación en el software, se realizará la comprobación de los resultados y de esta forma se evaluará la funcionalidad del mismo. Adicionalmente y aprovechando la versatilidad del software desarrollado, se realizará un análisis de cómo varía cada diagrama con el cambio de algún parámetro de entrada. Además, se obtendrá variables de salida de cada estado termodinámico, tales como la presión, temperatura, entropía, energía interna y exergía, y, parámetros del ciclo como la transferencia de calor de entrada y salida, el trabajo neto y la eficiencia.

Cabe indicar que el nuevo módulo propuesto se añadirá a los dos previos ya existentes: DT-Rkn (Diagramas termodinámicos del ciclo Rankine) y DT-Ref (Diagramas termodinámicos del ciclo de refrigeración por compresión de vapor).

1.1 Objetivo general

Desarrollar el módulo del software de diagramas interactivos orientado a la resolución del ciclo termodinámico Otto.

1.2 Objetivos específicos

1. Investigar el estado del arte del ciclo de potencia Otto y los conceptos básicos de la programación numérica y gráfica en Python.
2. Desarrollar la programación básica del ciclo Otto por los métodos aproximado exacto y comprobar los resultados para garantizar la precisión y confiabilidad.
3. Conceptualizar la representación gráfica del ciclo, desarrollar el código de los diagramas interactivos e implementarlos a la programación básica previa.
4. Comprobar la versatilidad y sensibilidad de las variables del ciclo en el software.
5. Plasmar el desarrollo del software en un documento escrito que incluya el manual de usuario.

1.3 Alcance

El presente documento pretende desarrollar un módulo para el software de diagramas interactivos mediante programación Python para el ciclo de potencia Otto, el cual será obtenido a partir del ingreso de variables típicas de entrada en sistemas termodinámicos simples, asociados a este ciclo. Estas variables pueden ser la presión, la temperatura y la relación de compresión del ciclo. En base a estos datos de entrada, se desarrollará la programación básica del ciclo Otto mediante el software Python por los métodos aproximado y exacto. Cabe indicar que para el análisis exergético se tomará en consideración la temperatura ambiente y la presión atmosférica. Se pretende obtener variables de salida en cada estado termodinámico y los diagramas interactivos (energía, exergía y entropía). Al tiempo de implementar cualquier modificación en el software, se

realizará la comprobación de los resultados y de esta forma se evaluará la funcionalidad del mismo. Este módulo será un aporte adicional a proyectos anteriores y servirá como soporte en el proceso de enseñanza-aprendizaje en la materia de Termodinámica y su respectivo laboratorio.

1.4 Marco teórico

En la presente sección se llevará a cabo el desarrollo teórico del ciclo termodinámico Otto, los parámetros necesarios para la interpretación gráfica de los diagramas interactivos de energía, exergía y entropía, y, además se detallará información relevante sobre la programación numérica y gráfica en Python.

Ciclo termodinámico

El ciclo termodinámico se define como un proceso o conjunto de ellos, los cuales presentan cierta secuencia, haciendo que el sistema evolucione hasta regresar a su estado inicial. Para una mayor comprensión del ciclo termodinámico, se toma en consideración ciertas suposiciones de transformaciones termodinámicas ideales, tales como:

- a) Isobárica: Proceso dado a presión constante.
- b) Isocórica: Proceso dado a volumen constante.
- c) Isotérmica: Proceso dado a temperatura constante.
- d) Adiabática: Proceso dado sin flujo de calor y sin rozamiento interno.

Ciclo Otto

El ciclo de potencia Otto trabaja en un sistema cerrado y es utilizado para el análisis de máquinas recíprocas de encendido por chispa [2]. Comúnmente denominado motor a gasolina, el cual es capaz de realizar un trabajo mediante la conversión de energía química en movimiento lineal alternativo y por consiguiente en movimiento circular, esto gracias al proceso de combustión controlado de un determinado combustible. Este ciclo consta de cuatro procesos internamente reversibles [4], donde dichos procesos están representados de forma gráfica mediante el diagrama termodinámico p-v (presión-volumen) de la Figura 1.1 y mediante el desenvolvimiento del pistón en la Figura 1.2.

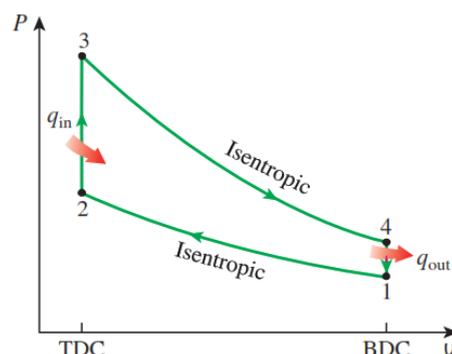


Figura 1.1 Diagrama termodinámico p-v del ciclo Otto [2]

Estado de 1 a 2: Compresión isentrópica, es decir, el sistema es adiabático y reversible
 Estado de 2 a 3: Adición de calor a volumen constante
 Estado de 3 a 4: Expansión isentrópica, es decir, el sistema es adiabático y reversible
 Estado de 4 a 1: Rechazo de calor a volumen constante

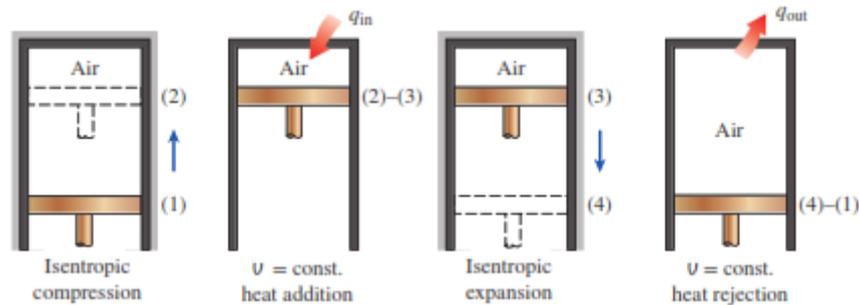


Figura 1.2 Esquema del cilindro pistón en el ciclo Otto [2]

Uno de los parámetros importantes en el motor a gasolina es su relación de compresión (Figura 1.3), la cual debe estar entre 8 y 11, esto debido a que, mientras mayor sea dicho parámetro, mayor será la probabilidad de un autoencendido, afectando de manera directa en el desempeño del motor.

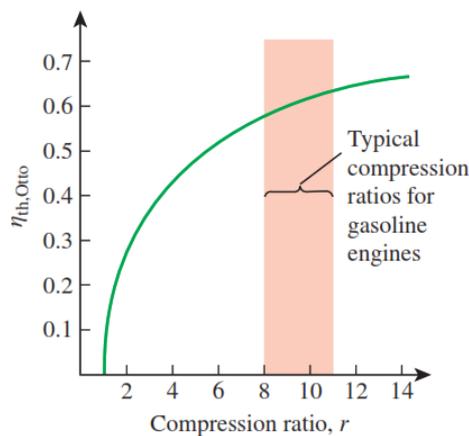


Figura 1.3 Relación de compresión del motor a gasolina [2]

El ciclo termodinámico ideal o teórico, (Figura 1.1) toma en consideración teorías básicas, para de esta manera lograr obtener ciertos cálculos y parámetros sencillos de la termodinámica clásica, como el trabajo y el rendimiento.

La descripción de los estados del ciclo termodinámico ideal (Figura 1.1) se presenta a continuación:

Estado de 1 a 2: (Compresión isentrópica). Donde el gas ideal (mezcla aire combustible) se comprime, disminuyendo su volumen desde un volumen 1 a un volumen 2, mientras existe un aumento de temperatura, desde una temperatura 1 hasta una temperatura 2.

Estado de 2 a 3: (Adición de calor). Proceso isocórico, donde ocurre la combustión y liberación de energía térmica, existiendo un aumento drástico en la presión y temperatura, todo esto manteniendo su volumen constante y sin generar trabajo.

Estado de 3 a 4: (Expansión isentrópica). Proceso donde existe una expansión adiabática del gas (mezcla aire combustible), es decir, no existe flujo de calor. Todo esto mientras disminuye la temperatura desde la temperatura 3 hasta la temperatura 4 con un aumento de volumen.

Estado de 4 a 1: (Rechazo de calor). Proceso isocórico, en donde existe una disminución paulatina de la energía térmica del gas conforme lo hace la presión, debido a la apertura de la(s) válvula(s) de escape y de nueva admisión, donde el aire que ingresa es más frío en comparación al que sale, todo esto manteniendo su volumen constante y sin generar trabajo.

Balance energético (E) en un sistema cerrado

En un sistema cerrado los estados tanto inicial y final son los mismos, por lo cual, la variación de energía de todo el sistema es igual a cero, tal como se expresa en la Ecuación 1.4.1 y, por ende, se tiene que la energía de entrada es igual a la energía de salida.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 0$$

Ecuación 1.4.1 Variación de energía en un sistema cerrado [2]

Donde:

ΔE : Indica la variación de energía del sistema.

E_1, E_2 : Indican la energía del estado inicial y final respectivamente.

El balance de energía puede ser expresado en unidad de masa, por lo que el mismo, queda relacionado en términos de calor y trabajo, tal como se encuentra expresado en la Ecuación 1.4.2.

$$\Delta e = q_{net,in} - w_{net,out} = q - w$$

Ecuación 1.4.2 Variación de energía expresado en unidad de masa [2]

Donde:

Δe : Indica la variación de energía expresado en unidad de masa.

q : Indica el calor en unidad de masa.

w : Indica el trabajo en unidad de masa.

Con lo cual se tiene que el $q_{net,in} = q_{in} - q_{out}$ y el $w_{net,out} = w_{out} - w_{in}$. Donde los subíndices "in" indica ingreso y "out" indica salida.

Cabe mencionar que el balance de energía involucra a la energía interna, cinética y potencial, sin embargo, la energía cinética y energía potencial son consideradas cero, debido a que el sistema no está acelerando y tampoco está descendiendo o cayendo, por lo cual la misma queda expresada por la energía interna.

Balance de entropía (S) en un sistema cerrado

Al hablar de entropía, se hace referencia a una propiedad que permite evaluar el desorden molecular que se da en un sistema. En los sistemas cerrados no existe una transferencia de flujo másico por sus fronteras, por lo cual, se puede considerar que la entropía del sistema está dada por la variación de la entropía inicial y final, y, por la transferencia de calor más la entropía generada en sus fronteras, tal como se encuentra expresada en la Ecuación 1.4.3.

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = \Delta S_{sistema} = S_2 - S_1$$

Ecuación 1.4.3 Entropía en un sistema cerrado [2]

Donde:

$\Delta S_{sistema}$: Representa la variación de entropía del sistema.

S_2 : Representa la entropía final.

S_1 : Representa la entropía inicial.

S_{gen} : Representa la entropía generada.

T_k : Representa la temperatura en la frontera.

Q_k : Representa la transferencia de calor en la frontera.

En el caso de un sistema adiabático, el calor (Q) es cero y por ende se tiene que la entropía generada $S_{gen} = \Delta S_{sistema}$. En el caso de la entropía generada se tiene que considerar a los alrededores y el sistema en sí, tal como se encuentra expresada en la Ecuación 1.4.4.

$$S_{gen} = \sum \Delta S = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores}$$

Ecuación 1.4.4 Entropía generada [2]

Donde la entropía del sistema está dada por $\Delta S_{sistema} = m(S_2 - S_1)$ y la entropía de los alrededores está dada por $\Delta S_{alrededores} = \frac{Q_{alrededores}}{T_{alrededores}}$

Donde:

$\Delta S_{sistema}$: Representa la entropía del sistema.

$\Delta S_{alrededores}$: Representa la entropía de los alrededores.

m : Representa la masa del sistema.

$Q_{alrededores}$: Representa la transferencia de calor en los alrededores.

$T_{alrededores}$: Representa la temperatura de los alrededores.

Balance exergético (X) en un sistema cerrado

Al hablar de exergía, se hace referencia a la cantidad máxima de trabajo que se puede obtener de un sistema en interacción con el ambiente (estado muerto). Existiendo una dependencia de los parámetros de la presión atmosférica y temperatura ambiente. Por

consiguiente, el balance de exergía del sistema está dado por la diferencia entre la exergía a través de las fronteras y la exergía destruida dentro de las mismas, tal como se expresa en la Ecuación 1.4.5.

$$\Delta X_{sistema} = (X_{in} - X_{out}) - X_{destruida}$$

Ecuación 1.4.5 Exergía de un sistema cerrado [2]

Donde:

$\Delta X_{sistema}$: Representa la exergía del sistema.

X_{in} : Representa la exergía de ingreso en la frontera.

X_{out} : Representa la exergía de salida en la frontera.

Y donde la exergía destruida ($X_{destruida}$) es considerada como el potencial de trabajo perdido, debido a irreversibilidades como la fricción, la transferencia de calor a una temperatura finita y procesos netos del sistema como la compresión y expansión.

Con esto en mente, se tiene que el balance de energía para cualquier proceso de flujo estacionario por unidad de masa está representado por la Ecuación 1.4.6.

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - w - P_0(V_2 - V_1) - T_0 S_{gen} = \Delta X_{sistema}$$

Ecuación 1.4.6 Análisis exergético de un sistema cerrado [2]

Donde:

$\Delta X_{sistema}$: Representa la exergía del sistema.

T_0 : Representa la temperatura ambiente.

T_k : Representa la temperatura en la frontera.

Q_k : Representa la transferencia de calor en la frontera.

P_0 : Representa la presión atmosférica.

V_2, V_1 : Representan los volúmenes final e inicial respectivamente.

S_{gen} : Representa la entropía generada.

La exergía de una masa fija para un determinado estado del ciclo está dada por la Ecuación 1.4.7, considerando despreciable a la energía cinética y potencial debido a las mismas consideraciones realizadas en el análisis de energía.

$$\phi = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

Ecuación 1.4.7 Exergía de flujo para una masa fija [2]

Donde:

ϕ : Representa la exergía de flujo para un determinado estado del ciclo.

u : Representa la energía interna para un determinado estado del ciclo.

u_0 : Representa la energía interna del estado muerto.

p_0 : Representa la presión del estado muerto.

v : Representa el volumen específico para un determinado estado del ciclo.

v_0 : Representa el volumen específico del estado muerto.

T_0 : Representa la temperatura del estado muerto.

s : Representa la entropía para un determinado estado del ciclo.

s_0 : Representa la entropía del estado muerto.

Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel, el cual permite la interacción directa de la máquina con el usuario. Esta interacción está dada debido a que Python es considerado un intérprete, es decir, lee el código fuente desarrollado y escrito por el programador, analiza e interpreta cada una de las líneas de programación conforme se procesa cada una de las instrucciones. A diferencia de otros lenguajes de alto nivel, este software es libre y su acceso se encuentra disponible en la red, permitiendo así a los usuarios acceder a toda la información disponible, facilitando el uso del mismo para la creación y desarrollo de nuevos programas.

Python posee una gran variedad de bibliotecas, las mismas que facilitan el desarrollo e interpretación numérica y gráfica de fenómenos físicos, bibliotecas como “numpy”, “math”, “CoolProp”, entre otras, permiten realizar cálculos numéricos de muchas funciones, permitiendo así el análisis de algún caso de estudio. Por otro lado, “matplotlib” permite realizar la interpretación gráfica de los cálculos numéricos realizados, de tal forma que se complementa el caso de estudio de manera más amplia y detallada.

Tkinter

Tkinter es un conjunto de widgets de la interfaz gráfica de usuario (GUI) para Python [7]. Considerada como una biblioteca de paquete multiplataforma de Python. Además de esta biblioteca, existen otras para la creación de interfaces gráficas como PyQt, kivy y wxPython [7], sin embargo, Tkinter destaca debido a la simplicidad con la que se puede trabajar, y, porque se relaciona con una amplia gama de widgets necesarios en la creación de una interfaz gráfica simple y completa.

Métodos de resolución

Los métodos de resolución de problemas termodinámicos del ciclo Otto son por el método aproximado y exacto, donde el método exacto destaca por el uso de las tablas termodinámicas, mientras que el método aproximado destaca por el uso de consideraciones básicas como la ecuación de los gases ideales y las relaciones isentrópicas, expuestas en el libro de Cengel [2].

a) Método exacto

Para la resolución de problemas termodinámicos del ciclo Otto por el método exacto se toma en consideración al menos dos propiedades de un estado termodinámico y con ayuda de las tablas termodinámicas (específicamente la tabla A17 de Cengel [2], para

el sistema internacional) se procede a calcular las propiedades en cada estado, para ello es necesario tomar en consideración las siguientes ecuaciones:

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{V_{r1}}{V_{r2}} = \frac{V_4}{V_3} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{V_{r4}}{V_{r3}}$$

Ecuación 1.4.8 Relación de compresión [2]

Donde:

r : Representa la relación de compresión del ciclo.

V_1, V_2 : Representan el volumen total del estado 1 y 2 respectivamente.

v_1, v_2 : Representa el volumen específico del estado 1 y 2 respectivamente.

V_{r1}, V_{r2} : Representan el volumen específico relativo del estado 1 y 2 respectivamente.

Para el cálculo de la adición y rechazo de calor se utilizan la Ecuación 1.4.9.

$$q_a = u_3 - u_2 \leftrightarrow q_r = u_4 - u_1$$

Ecuación 1.4.9 Adición y rechazo de calor [2]

Donde:

q_a, q_r : Representan la adición y rechazo de calor respectivamente.

u_3, u_2 : Representan la energía interna del estado 3 y 2 respectivamente.

u_4, u_1 : Representan la energía interna del estado 4 y 1 respectivamente.

El trabajo neto está dado por la Ecuación 1.4.10.

$$w_{neto} = q_a - q_r$$

Ecuación 1.4.10 Trabajo neto del ciclo Otto [2]

Donde:

w_{neto} : Representa el trabajo neto del ciclo.

q_a, q_r : Representan la adición y rechazo de calor respectivamente.

Mientras que la eficiencia del ciclo está dada por la Ecuación 1.4.11.

$$\eta = \frac{w_{neto}}{q_a} = \left(1 - \frac{q_r}{q_a}\right)$$

Ecuación 1.4.11 Eficiencia del ciclo Otto [2]

Donde:

η : Representa la eficiencia del ciclo.

w_{neto} : Representa el trabajo neto del ciclo.

q_a, q_r : Representan la adición y rechazo de calor respectivamente.

Y la presión media efectiva (PME) está dada por la Ecuación 1.4.12.

$$PME = \frac{w_{neto} * m}{V_1 - V_2}$$

Ecuación 1.4.12 Presión media efectiva del ciclo Otto [2]

Donde:

PME : Representa la presión media efectiva del ciclo.

w_{neto} : Representa el trabajo neto del ciclo.

m : Representa la masa total.

V_1, V_2 : Representan el volumen total del estado 1 y 2 respectivamente.

Para el cálculo de las propiedades de cada estado termodinámico se necesita conocer una propiedad, por ejemplo, la temperatura del estado 1, con ello, mediante las tablas termodinámicas se puede evaluar el V_{r1} , u_1 , etc., para la respectiva temperatura y con las ecuaciones definidas previamente se puede calcular las propiedades del estado 2, 3 y 4.

b) Método aproximado

En el caso del método aproximado se toma en consideración la ecuación de los gases ideales (Ecuación 1.4.13) al igual que para del método exacto, sin embargo, no existe mayor relevancia para el uso de las tablas termodinámicas, en este caso, es necesario considerar las relaciones isentrópicas, tomando en cuenta que para el ciclo Otto solo es necesario utilizar el calor específico a volumen constante (C_v) debido a que durante el ciclo no existe procesos dados a presión constante.

$$PV = mRT$$

Ecuación 1.4.13 Ecuación de los gases ideales [2]

Donde:

P : Representa la presión de cualquier estado.

V : Representa el volumen de cualquier estado.

m : Representa la masa de cualquier estado.

R : Representa la constante universal de los gases.

T : Representa la temperatura para cualquier estado.

Por otro lado, las relaciones isentrópicas están dadas por la Ecuación 1.4.14.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \leftrightarrow \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \leftrightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} \leftrightarrow P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

Ecuación 1.4.14 Relaciones isentrópicas del ciclo Otto [2]

Donde:

T_2, T_1 : Representan la temperatura del estado 2 y 1 respectivamente.

V_2, V_1 : Representan el volumen total del estado 2 y 1 respectivamente.

P_2, P_1 : Representan la presión del estado 2 y 1 respectivamente.

k : Representa la relación de calores específicos.

Con las ecuaciones mencionadas previamente se puede calcular cada una de las propiedades de los estados termodinámicos a analizar, tomando en cuenta que también se debe considerar a la Ecuación 1.4.8 para los cálculos mediante este método.

Para el cálculo de la adición y rechazo de calor, se toma en consideración la Ecuación 1.4.15.

$$q_a = C_v(T - T_2) \leftrightarrow q_r = C_v(T_4 - T_1)$$

Ecuación 1.4.15 Adición y rechazo de calor para el ciclo Otto [2]

Donde:

q_a, q_r : Representan la adición y rechazo de calor respectivamente.

T_3, T_2 : Representan la temperatura del estado 3 y 2 respectivamente.

T_4, T_1 : Representan la temperatura del estado 4 y 1 respectivamente.

C_v : Representa el calor específico a volumen constante del gas ideal.

En el caso del trabajo neto, la eficiencia y la presión media efectiva se calculan utilizando la Ecuación 1.4.10, Ecuación 1.4.11 y Ecuación 1.4.12 respectivamente, las cuales fueron definidas previamente para el método exacto.

Sin embargo, se debe considerar que, para el cálculo de las energías internas, se debe utilizar la Ecuación 1.4.16.

$$u_n = C_v T_n$$

Ecuación 1.4.16 Cálculo de energías internas por el método aproximado

Donde:

u_n : Representa la energía interna de cualquiera de los estados.

C_v : Representa el calor específico a volumen constante del gas ideal.

T_n : Representa la temperatura absoluta de cualquiera de los estados.

2 METODOLOGÍA

El desarrollo del presente trabajo está basado en un planteamiento deductivo, partiendo de las consideraciones de la termodinámica clásica para la resolución de problemas termodinámicos del ciclo Otto. Basando su enfoque de manera cuantitativa, esto debido a que, se tiene un problema que se puede medir, se recolecta información previa sobre el mismo, se sigue una serie de procesos claramente definidos y no se parte de una hipótesis como tal. El tipo de trabajo a realizar es exploratorio y experimental, dado que, partiendo de investigaciones previas sobre el desarrollo de un software para la resolución de problemas termodinámicos, y en este caso en específico del ciclo Otto, se busca implementar un módulo para la resolución tanto numérica como gráfica de este ciclo termodinámico. Al estar basado en estos estudios, el análisis investigativo estará orientado a la interpretación de información relevante sobre el tema mencionado ya sea en documentos de texto, libros, tesis, revistas e informes etc., los cuales servirán como base para exponer de forma clara y concisa el trabajo a realizar.

La metodología utilizada se encuentra expresada de manera general en la Figura 2.1, de tal forma que se obtiene una amplia sobre desarrollo del presente documento.

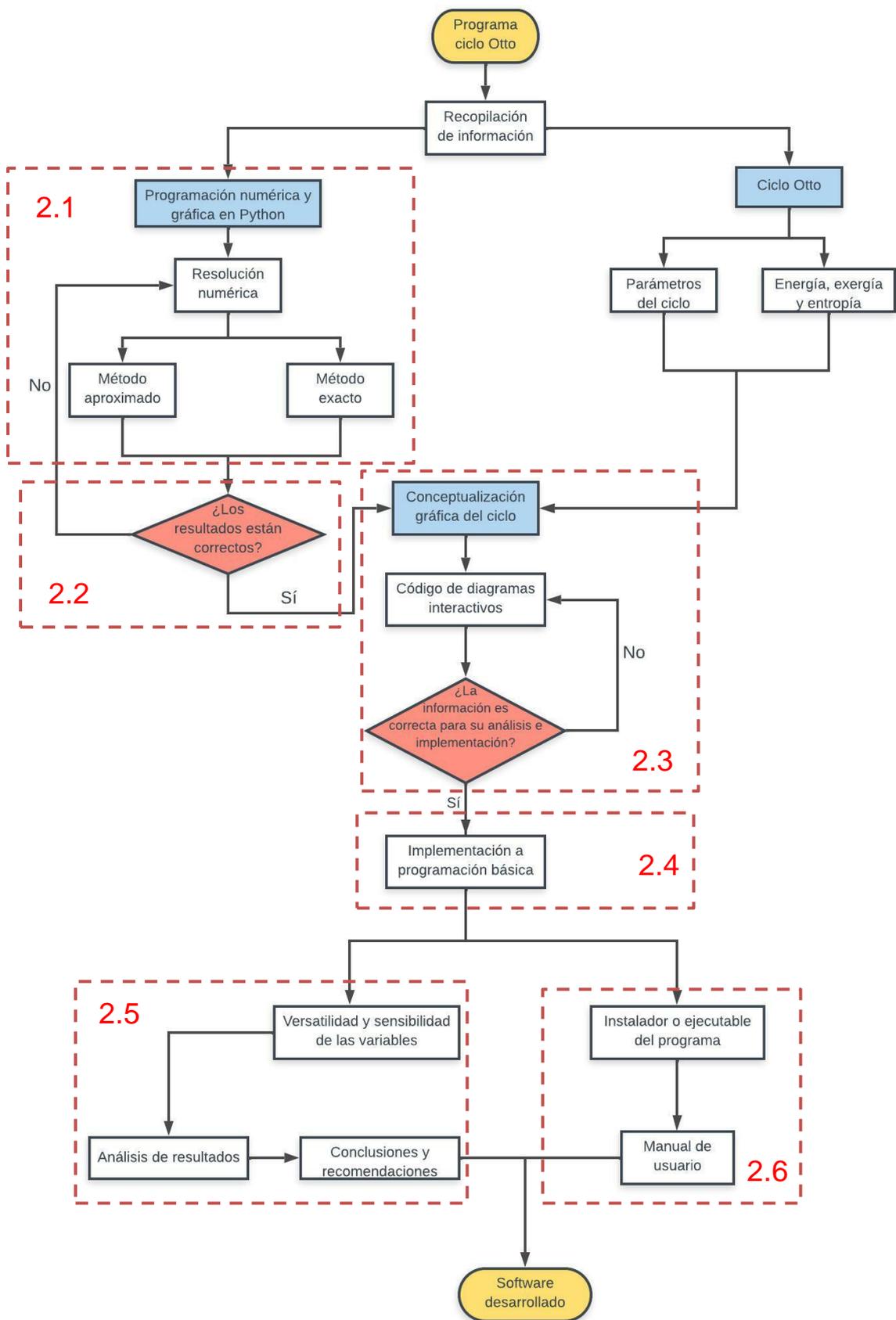
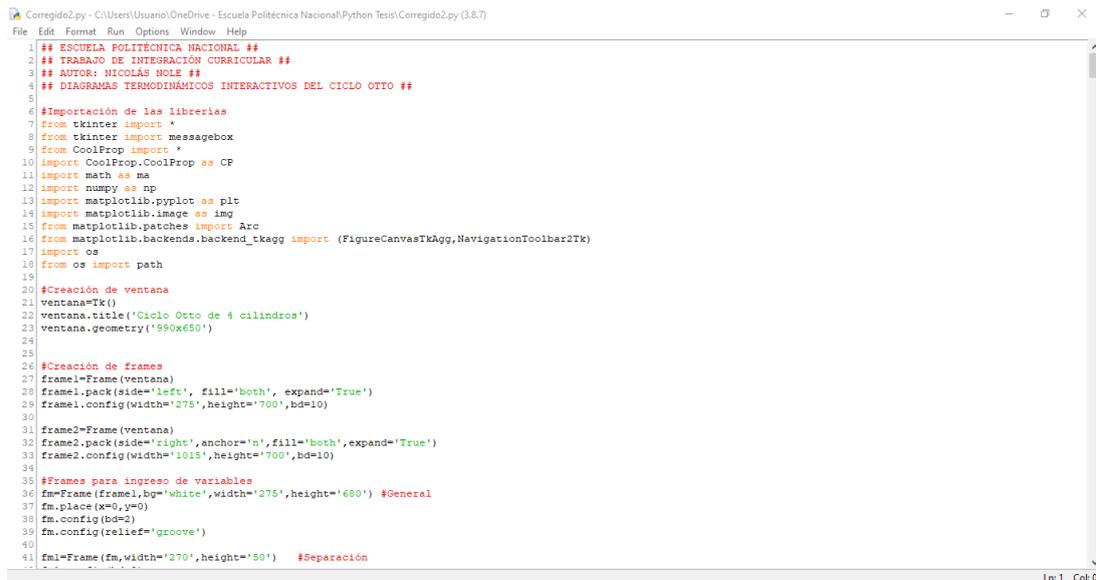


Figura 2.1 Metodología a utilizar

2.1 Programación numérica en Python

Para el desarrollo de la programación numérica del software a realizar, primero se escoge con que editor de código fuente se va a trabajar, en este caso se tiene varios, tales como: el entorno de desarrollo integrado de Python (IDLE), Spyder, Sublime Text 3, etc., los cuales tienen como objetivo obtener un código más simplificado. Para el presente trabajo se optó por utilizar el (IDLE) debido al manejo y conocimiento previo del mismo y la versión de Python utilizada para la creación del software es la 3.8.7, ver (Figura 2.2).



```
Corregido2.py - C:\Users\Usuario\OneDrive - Escuela Politécnica Nacional\Python Tesis\Corregido2.py (3.8.7)
File Edit Format Run Options Window Help
1 ## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL ##
2 ## TRABAJO DE INTEGRACION CURRICULAR ##
3 ## AUTOR: NICOLÁS NOLE ##
4 ## DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS INTERACTIVOS DEL CICLO OTTO ##
5
6 #Importación de las librerías
7 from tkinter import *
8 from tkinter import messagebox
9 from CoolProp import *
10 import CoolProp.CoolProp as CP
11 import math as ma
12 import numpy as np
13 import matplotlib.pyplot as plt
14 import matplotlib.image as img
15 from matplotlib.patches import Arc
16 from matplotlib.backends.backend_tkagg import (FigureCanvasTkAgg, NavigationToolbar2TK)
17 import os
18 from os import path
19
20 #Creación de ventana
21 ventana=Tk()
22 ventana.title('Ciclo Otto de 4 cilindros')
23 ventana.geometry('990x650')
24
25
26 #Creación de frames
27 frame1=Frame(ventana)
28 frame1.pack(side='left', fill='both', expand='True')
29 frame1.config(width='275',height='700',bd=10)
30
31 frame2=Frame(ventana)
32 frame2.pack(side='right', anchor='n', fill='both', expand='True')
33 frame2.config(width='1015',height='700',bd=10)
34
35 #Frames para ingreso de variables
36 fm=Frame(frame1,bg='white',width='275',height='680') #General
37 fm.place(x=0,y=0)
38 fm.config(bd=2)
39 fm.config(relief='groove')
40
41 fm1=Frame(fm,width='270',height='50') #Separación
Ln: 1 Col: 0
```

Figura 2.2 IDLE Python

Librerías

Una de las ventajas de Python es que cuenta con una amplia gama de librerías internas y externas, las cuales permiten realizar diversas tareas del código a programar. En el caso de las librerías externas tales como CoolProp, es necesario realizar la instalación de la misma, para ello se utiliza la herramienta PyPI, la cual, en las últimas versiones de Python viene instalada por defecto. La instalación de las estas librerías se la realiza mediante el comando “pip install (nombre de la librería)” en la consola de nuestro computador, para posteriormente ser llamadas desde el código de programación. Y en el caso de las librerías internas, solo es necesario llamarlas desde el código, debido a que las mismas se incluyeron desde la instalación de Python.

Las librerías para utilizar se encuentran descritas en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Librerías a utilizar

No.	Librería	Descripción
1	numpy	Librería que permite manipular y crear matrices o en su defecto arreglo de datos
2	os	Librería que permite obtener información mediante funciones
3	tkinter	Librería que permite la creación, manipulación y personalización de widgets para ventanas gráficas
4	CoolProp	Librería que permite extraer datos de todas las propiedades termodinámicas de diversos fluidos de trabajo
5	matplotlib	Librería que permite crear, manipular y personalizar gráficos en 2D o 3D
6	math	Librería que permite acceder a las funciones matemáticas

La importación de la librería puede ser en su totalidad o de una función en específico, en el caso de exportar la totalidad de la misma se tiene la siguiente línea de programación: “*from* (nombre de la librería) *import* *”. Y en el caso de extraer una función en específico de la librería, se debe utilizar la siguiente línea de programación: “*from* (nombre de la librería) *import* (nombre de la función)”. De necesitar una abreviación de la librería para llamar ciertas funciones, debido a que su nombre es demasiado extenso, se puede importar la misma como una abreviatura, utilizando la siguiente línea de programación: “*import* (nombre de la librería) *as* (Abreviación)”, todo esto se muestra en la Figura 2.3 Importación de librerías

```
#Importación de las librerías
from tkinter import *
from tkinter import messagebox
from CoolProp import *
import CoolProp.CoolProp as CP
import math as ma
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.image as img
from matplotlib.patches import Arc
from matplotlib.backends.backend_tkagg import (FigureCanvasTkAgg, NavigationToolbar2Tk)
import os
from os import path
```

Figura 2.3 Importación de librerías

Con las librerías a utilizar importadas en el código, se procede a realizar la programación de los cálculos numéricos, en este caso es necesario conocer por lo menos dos propiedades termodinámicas asociadas a dos estados del ciclo Otto. Con esto en mente, para poder extraer las mismas en el código es necesario definir las variables de ingreso como números flotantes, debido a que Python interpreta el ingreso de datos como si fueran cadenas de texto, para ello es necesario utilizar la función “float”, tal como se muestra en la Figura 2.4.

```

r=float(re.get())
T1=float(T1e.get())
P1=float(P1e.get())
V1=float(V1e.get())
T3=float(T3e.get())
Patm=float(Patme.get())
Tamb=float(Tambe.get())

```

Figura 2.4 Ingreso de datos como números flotantes

Cabe mencionar que la función “get” hace referencia a la obtención del dato desde la interfaz, donde el usuario ingresará el mismo.

Se considera las variables de entrada mostradas previamente, debido a que con las mismas se puede obtener el resto de los estados utilizando las ecuaciones mencionadas en el capítulo 1, ya sea por el método exacto o aproximado. Además, para poder desarrollar la programación numérica, es necesario realizar ciertas consideraciones a las variables de entrada ingresadas, tales como:

- La relación de compresión (r) debe ser mayor a 1.
- La temperatura 1 (T_1) debe ser menor a la temperatura 3 (T_3).
- La temperatura 3 (T_3) no debe ser mayor a 3000 [K].
- Todos los parámetros ingresados deben ser positivos diferente de cero.

Estas consideraciones se realizan tomando en cuenta valores cercanos a la realidad, para de esta forma poder obtener gráficas más acordes a lo real.

Con el ingreso de datos se puede realizar la obtención de cada una de las propiedades en cada estado termodinámico, en este caso, en la Figura 2.5 se muestra la obtención de estas propiedades para el estado termodinámico uno mediante el método exacto, con ayuda de la librería “CoolProp” y su función “PropsSI”, la misma que admite 6 parámetros. El primero está relacionado con la propiedad a obtener, el segundo y cuarto están relacionados con dos propiedades conocidas, el tercero y quinto están relacionados con los valores de dichas propiedades conocidas, y, por último, el sexto parámetro hace referencia al fluido de trabajo, en este caso en específico el aire.

```

#Compresión isentrópica de 1 a 2
Vlex=V1/(1000000)#Volumen [m^3]
Tlex=T1 #Temperatura [K]
Plex=P1 #Presión [Pa]
Slex=CP.PropsSI('S','T',Tlex,'P',Plex,'Air') #Entropía [J/kg.K]
Ulex=CP.PropsSI('U','T',Tlex,'P',Plex,'Air') #Energía interna [J/kg]
Dlex=CP.PropsSI('D','T',Tlex,'P',Plex,'Air') #Densidad [kg/m^3]

```

Figura 2.5 Cálculo de las propiedades del estado termodinámico 1

Una vez obtenidas las propiedades del estado uno, se realiza los cálculos correspondientes para poder obtener al menos dos propiedades de los siguientes estados, utilizando las ecuaciones del capítulo 1, según corresponda el método a utilizar.

Ya obtenidas todas las propiedades de cada estado termodinámico, se puede realizar los

cálculos correspondientes al ingreso y rechazo de calor (q_a , q_r), trabajo neto (w_{neto}), eficiencia (η), presión media efectiva (PME) y variaciones de energías internas (Δu). Todos estos parámetros necesarios como información relevante del ciclo y como parte de la programación básica para el desarrollo gráfico.

Para el caso del método aproximado, se importa las mismas librerías exceptuando la de “CoolProp”, ya que no se utilizará las tablas termodinámicas. En este caso serán necesarias las consideraciones termodinámicas clásicas del ciclo Otto y sus relaciones isentrópicas, las mismas que se encuentran expresadas en el capítulo 1.

2.2 Validación de resultados numéricos

La validación de los resultados numéricos obtenidos por el software se la realiza mediante la comparación con cálculos realizados de manera analítica, los cálculos realizados por Cengel, los cuales se encuentran expresados en la Tabla 2.2 y en comparación con el programa TermoGraf v5.7, expresados en la Tabla 2.3.

El problema planteado fue tomado del libro de Cengel [2] tomando en consideración los siguientes datos:

$$r = 9.5 \leftrightarrow P_1 = 100 \text{ kPa} \leftrightarrow T_1 = 308 \text{ K} \leftrightarrow V_1 = 600 \text{ cm}^3 \leftrightarrow T_3 = 1969 \text{ K}$$

Con dichos datos se realizó los cálculos correspondientes, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2.2 Validación de los resultados generales del ciclo por el método aproximado

Valores	RESULTADOS		
	DT-Otto aproximado	Analítico aproximado	Cengel aproximado
q_a [kJ/kg]	869.53	869.53	869.18
Error [%]	-	0	0.04
q_r [kJ/kg]	353.34	353.35	353.57
Error [%]	-	0.003	0.07
w_{neto} [kJ/kg]	516.19	516.18	515.61
Error [%]	-	0.002	0.11
η [%]	59.36	59.36	59.4
Error [%]	-	0	0.07
PME [kPa]	652.65	652.68	652
Error [%]	-	0.005	0.10

De la Tabla 2.2 se puede evidenciar que el error más alto fue para el trabajo neto (W_{neto}), con un valor del 0.11%, mientras que el error más bajo fue para el calor añadido (q_a), con un valor del 0.04%, es decir, los errores obtenidos están por debajo del 1%, tanto para la resolución analítica y la resolución presentada por Cengel, con lo cual, se puede concluir que los cálculos numéricos obtenidos por parte del programa fueron correctos para el método aproximado.

Tabla 2.3 Validación de los resultados generales del ciclo por el método exacto

Valores	RESULTADOS		
	DT-Otto exacto	Analítico exacto	TermoGraf exacto
q_a [kJ/kg]	1107.38	1109.75	1107.78
Error [%]	-	0.21	0.04
q_r [kJ/kg]	508.4	511.1	510.35
Error [%]	-	0.53	0.38
w_{neto} [kJ/kg]	598.98	598.65	597.43
Error [%]	-	0.06	0.26
η [%]	54.09	53.94	53.93
Error [%]	-	0.28	0.3
PME [kPa]	757.38	756.95	755.21
Error [%]	-	0.06	0.29

De la Tabla 2.3 se puede evidenciar que el error más alto fue para el calor rechazado (q_r), con un valor del 0.53% en comparación con la resolución analítica, mientras que el error más bajo fue para el calor añadido (q_a), con un valor del 0.04% arrojado por parte del programa en comparación con TermoGraf, es decir, los errores obtenidos están por debajo del 1%, tanto para la resolución analítica y la resolución presentada por TermoGraf, con lo cual, se puede concluir que los cálculos numéricos obtenidos por parte del programa fueron correctos para el método exacto.

En la Figura 2.6 se muestra el problema realizado mediante el software TermoGraf.

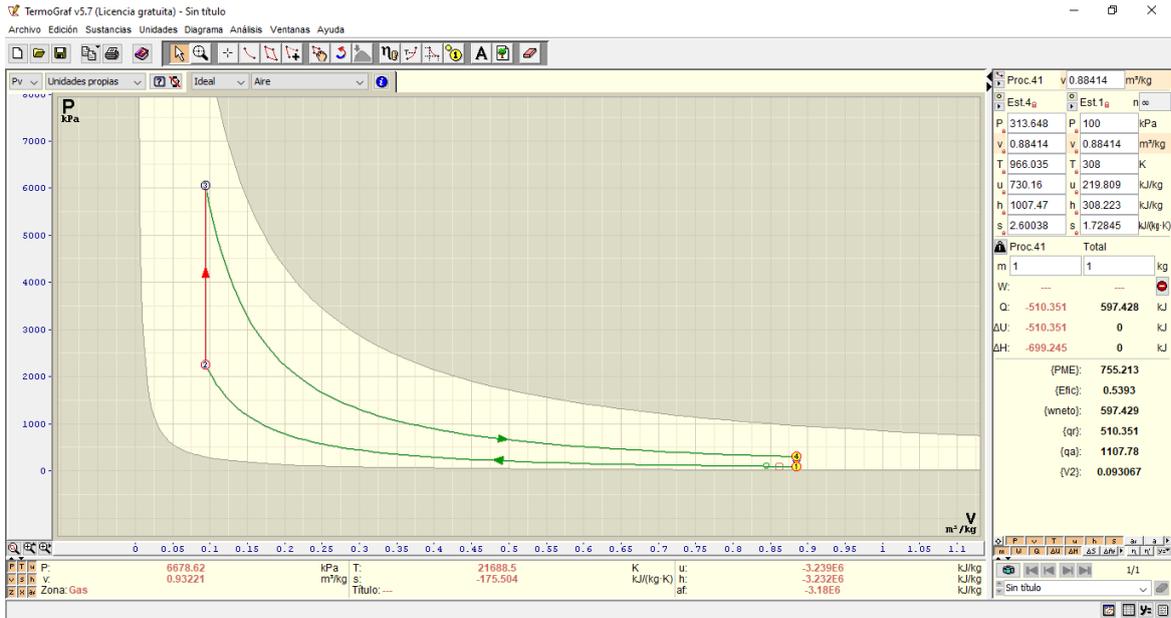


Figura 2.6 Problema realizado en TermoGraf.

2.3 Programación gráfica con Tkinter

Para la programación gráfica, primero es necesario visualizar como se efectuará la interpretación de estas, con el fin de que esta interpretación sea fácil de asimilar. Para ello se decidió expresar la gráfica mediante la unión de arcos en un plano de coordenadas, simulando los cuatro procesos dados en el ciclo, todo esto en sentido horario. Con esto en mente, se procede a la creación de una gráfica base, la misma que servirá para poder visualizar las figuras desarrolladas, para ello se crea un “frame” adicional donde se ubicarán las gráficas correspondientes. Primero se crea una gráfica en blanco, en donde se añadirán los ejes y el círculo base, tal como se encuentra expresado en la Figura 2.7.

```
#####Creación de gráfica base para diagramas#####
framebase=Frame(frame2,width='450',height='450') #Creación de frame para gráficas
framebase.place(x=0,y=225) #Ubicación
framebase.config(bd=3) #Ancho de borde
framebase.config(relief='sunken') #Efecto del relieve del widget
fig=plt.Figure(figsize=(4.5,4.5),dpi=100) #Creación de figura base
ax=fig.add_subplot() #Adición de conjunto de ejes a la figura creada
ax.axis('off')

base=FigureCanvasTkAgg(fig,framebase) #Adición de figura y frame a la interfaz
base.get_tk_widget().place(x=0,y=0) #Ubicación

x1,y1=[150,300],[150,150] #Creación de ejes
x2,y2=[150,150],[150,0]
x3,y3=[150,0],[150,150]
x4,y4=[150,150],[150,300]
ax.plot(x1,y1,color='black',ls='--') #Creación de gráfica de ejes
ax.plot(x2,y2,color='black',ls='--')
ax.plot(x3,y3,color='black',ls='--')
ax.plot(x4,y4,color='black',ls='--')

ax.set_title('Gráficas',font='Courier new',style='italic',color='red',fontsize='11') #Titulo
circulo=plt.Circle((150,150),55,fill=False) #Creación de círculo base en gráfica

toolbar=NavigationToolbar2Tk(base,framebase) #Adición barra de herramientas a gráfico base
toolbar.update()
toolbar.place(x=0,y=0,width=240,height=30) #Ubicación
ax.add_artist(circulo) #Agregar círculo a figura base
```

Figura 2.7 Creación de gráfica base

Cabe mencionar que a esta gráfica base se le puede incluir una barra de herramientas, la misma que servirá de apoyo para una mejor interacción del usuario con la gráfica desarrollada.

Una vez realizado esto, se puede sustituir la misma por el diagrama correspondiente, esto con ayuda de la función “ax.clear ()” tal como se muestra en la Figura 2.8. Luego, se incluye las líneas de programación para dibujar cada uno de los arcos radiales y angulares y de esta forma obtener el diagrama de energía, exergía o entropía.

```
def entropia():
    ax.clear()
    ax.axis('off')

    x1,y1=[150,300],[150,150]
    x2,y2=[150,150],[150,0]
    x3,y3=[150,0],[150,150]
    x4,y4=[150,150],[150,300]
    ax.plot(x1,y1,color='black',ls='--')
    ax.plot(x2,y2,color='black',ls='--')
    ax.plot(x3,y3,color='black',ls='--')
    ax.plot(x4,y4,color='black',ls='--')

    ax.set_title('Gráfica de Entropía',font='Courier new',style='italic',color='red',fontsize='11')

    circulo=plt.Circle((150,150),55,fill=False)
    ax.add_artist(circulo)
```

Figura 2.8 Representación de gráfica desarrollada en la interfaz

Para el desarrollo de las gráficas a obtener, se considera al círculo base con un nivel referencial de cero para los diagramas de energía y exergía, mientras que, para el diagrama de entropía, la referencia es el mínimo valor de dicha propiedad. Considerando esto, para poder obtener cada gráfica se realiza una linealización mediante un sistema de ecuaciones, las cuales permiten obtener la variación ya sea de energía, entropía o exergía del ciclo, esta linealización se considera partiendo de que el ciclo será representado en sentido horario y que la variación angular representa el cambio de un estado a otro, mientras que el cambio radial representa la variación de los tres diagramas a obtener. La Figura 2.9 muestra las ecuaciones utilizadas para la linealización realizada en el diagrama de energía.

```
if beta>=0 and beta<(pi/2):
    uex=(Ulex+((U4ex-Ulex)*(beta/(pi/2))))*dr
    uza=U4ex*dr

    x=((55+uex)*(np.cos(beta)))+150
    y=((55+uex)*(np.sin(beta)))+150

    xu=((55+uza)*(np.cos(beta)))+150
    yu=((55+uza)*(np.sin(beta)))+150

    xa=(55*(np.cos(beta)))+150
    ya=(55*(np.sin(beta)))+150

    xfa,yfa=[xa,x],[ya,y]
    xfza,yfza=[xa,xu],[ya,yu]

    ax.plot(xfza,yfza,color='green',ls='--',alpha=0.8)
    ax.plot(xfa,yfa,color='cyan',ls='--',alpha=1)
```

Figura 2.9 Ecuaciones utilizadas para la gráfica de energía en el cuarto cuadrante.

Donde “beta” representa el ángulo del cambio de un estado a otro y la ecuación “ u_{ex} ” indica la linealización utilizada para el diagrama de energía, mientras que las ecuaciones “ x ” y “ y ” representan la variación angular de un estado a otro, “ x_a ” y “ y_a ” muestran la variación radial del cambio de energía interna y por ultimo las ecuaciones “ x_u ” y “ y_u ” indican la variación radial de los componentes energéticos que se da en su respectivo cuadrante, tal es el caso de adición de calor, rechazo de calor, trabajo de compresión o trabajo o expansión. Y en el caso de los diagramas de entropía y exergía se utiliza la misma ecuación inicial, variando la propiedad a obtener, siendo esta la energía interna por la entropía y exergía. Cabe señalar que, en estos diagramas no existe la presencia de las ecuaciones “ x_u ” y “ y_u ”, pues las mismos indican la variación radial de los componentes energéticos mencionados previamente, por lo que no se ven involucrados en estos diagramas.

2.4 Interpretación gráfica de los diagramas

Las gráficas obtenidas representan un ciclo en sentido horario, partiendo de que el círculo base tiene un nivel referencial. La referencia es cero para los diagramas de energía y exergía. En cambio, para el diagrama de entropía, la referencia es el mínimo valor de dicha propiedad. La representación gráfica constituye un desarrollo totalmente nuevo, pues no se ha encontrado gráficas similares previas desarrolladas por otros autores. Se considera entonces los puntos de vista del tutor y los autores involucrados en este Trabajo de Integración Curricular, y se establece apropiado la representación sobre un círculo por tratarse de un ciclo. Con lo cual se realiza una gráfica base que cuenta con 4 cuadrantes redefinidos (respecto a la definición tradicional) para este documento acorde a la Figura 2.10.

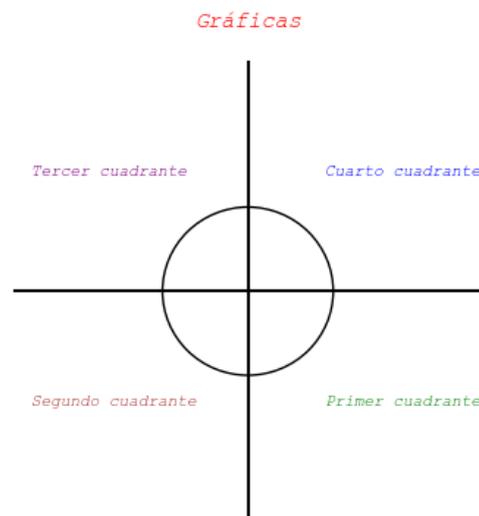


Figura 2.10 Imagen base para representación gráfica

La interpretación de cada cuadrante se muestra a continuación:

Primer cuadrante: Compresión isentrópica (estado 1 a estado 2).

Segundo cuadrante: Adición de calor a volumen constante (estado 2 a estado 3).

Tercer cuadrante: Expansión isentrópica (estado 3 a estado 4).

Cuarto cuadrante: Rechazo de calor a volumen constante (estado 4 a estado 1).

Con esto en mente, la representación gráfica para la energía se muestra en la Figura 2.11.

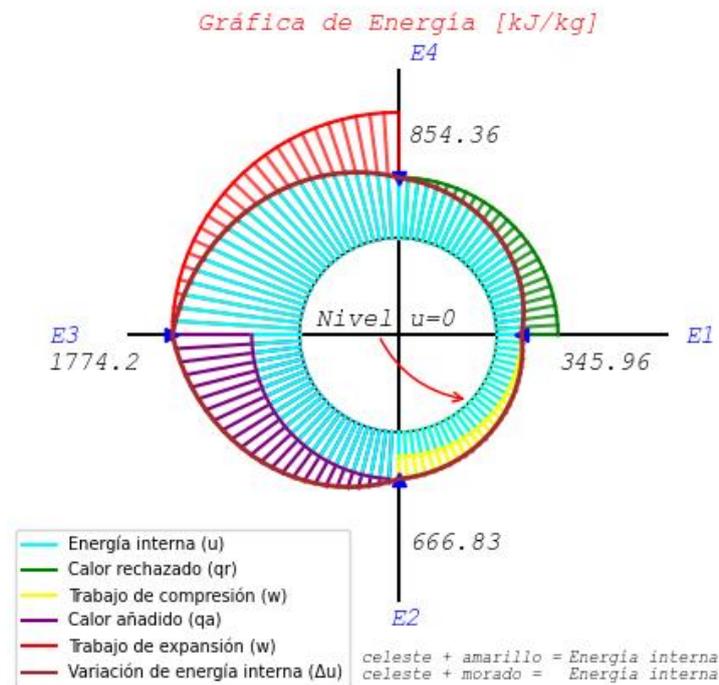


Figura 2.11 Gráfica de energía mediante el método exacto

La Figura 2.11 muestra la variación de energía interna del ciclo Otto con sus respectivas propiedades dadas en cada estado termodinámico. Este diagrama utiliza diferentes colores que permiten identificar de mejor manera los componentes energéticos involucrados en cada uno de los procesos del ciclo.

La gráfica en cada eje muestra el valor de energía interna (energía que caracteriza el estado termodinámico de la sustancia en un sistema cerrado). Con esto en mente se tiene qué, la variación total de la energía está representada por la curva color café. Mientras que los procesos dados en el ciclo se detallan por cuadrantes (Figura 2.10), donde para el primer cuadrante (compresión isentrópica), existe un aumento de la energía interna a lo largo del proceso y la representación de la misma está dada por las líneas de color celeste (valor inicial de energía interna para este proceso) más las líneas de color amarillo (aporte de trabajo de compresión), pues al ser un aporte de energía al ciclo, este trabajo se encuentra dentro de la variación total. Para el segundo cuadrante (adición de calor a volumen constante), existe un aumento de la energía interna a lo largo del proceso y su representación está definida por las líneas de color celeste (valor inicial de energía interna

para este proceso) más las líneas moradas (aporte de calor añadido), y, al igual que en el primer cuadrante, este componente energético aporta al ciclo, por lo que se encuentra dentro de la variación total. Para el tercer cuadrante (expansión isentrópica), existe una disminución de la energía interna a lo largo del proceso y la representación de la misma está dada por las líneas de color celeste, mientras que las líneas rojas indican el trabajo que está siendo desarrollado por el proceso de expansión, y, al ser un trabajo que no aporta al aumento de energía del ciclo, este se encuentra fuera de la curva de la variación total. Para el cuarto cuadrante (rechazo de calor a volumen constante), existe una disminución de la energía interna a lo largo del proceso y su representación está definida por las líneas de color celeste, mientras que las líneas verdes indican el calor rechazado durante el proceso, y, al igual que en el tercer cuadrante, este componente energético no aporta al aumento de energía del ciclo, por lo que se encuentra fuera de la variación total.

La representación gráfica para la entropía se muestra en la Figura 2.12

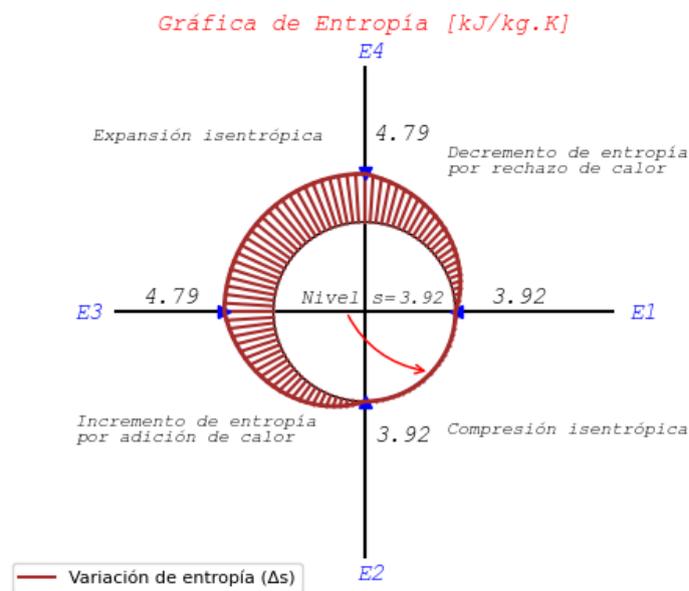


Figura 2.12 Representación gráfica de la entropía

La Figura 2.12 indica la variación de entropía desde un estado a otro, la cual está representada de forma angular por el arco de color café, mientras que la longitud de las líneas radiales representa la variación de la entropía respecto al estado uno. Las etiquetas en cada uno de los ejes muestran el valor de la entropía para dicho estado. Sin embargo, el diagrama muestra la variación de la entropía de cada estado respecto a la entropía uno, con la finalidad de amplificar apropiadamente los pequeños cambios de entropía en el ciclo. Cabe señalar que para esta representación gráfica se considera al círculo base con un nivel de entropía igual al menor valor obtenido en los estados del ciclo, siendo este el estado uno. Adicionalmente, en cada cuadrante se muestran textos que ayudan a

identificar qué procesos se dan en la variación de un estado a otro.

La representación gráfica de la exergía se muestra en la Figura 2.13.

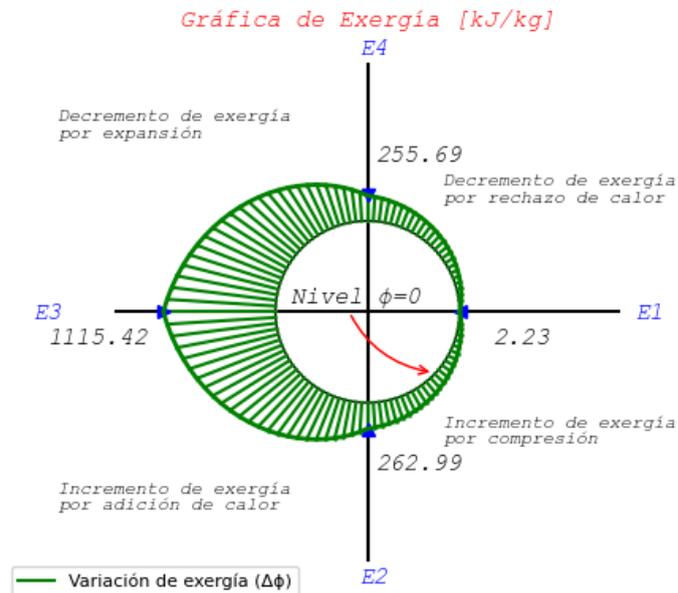


Figura 2.13 Representación gráfica de la exergía

La Figura 2.13 muestra la variación de exergía desde un estado a otro, la cual está representada de forma angular mediante el arco color verde, mientras que la longitud de las líneas radiales representa la exergía como tal. En cada uno de los ejes se muestra las etiquetas que indican el valor de la exergía para su respectivo estado termodinámico, considerando que el círculo base tiene un nivel referencial cero de exergía y todo el proceso se da en sentido horario. Adicionalmente, en cada cuadrante se muestran textos que ayudan a identificar qué procesos se dan en la variación de un estado a otro. Cabe señalar, que, en el primer cuadrante (compresión isentrópica) y en el segundo cuadrante (adición de calor a volumen constante), existe un aumento de exergía, mientras que en el tercer cuadrante (expansión isentrópica) y el cuarto cuadrante (rechazo de calor a volumen constante) hay una disminución de esta propiedad, sin embargo, para el tercer cuadrante, esta propiedad es una exergía utilizada, la cual aún contribuye al desarrollo del ciclo como tal, mientras que en el cuarto cuadrante es una exergía destruida, es decir, es un potencial de trabajo perdido, el cual es rechazado en forma de calor.

2.5 Programación de la interfaz de usuario con Tkinter

Para la creación de la interfaz gráfica de usuario se realiza la creación de una ventana con la biblioteca Tkinter, a la cual se le puede realizar arreglos como un título, ajustar su tamaño, etc, tal como se muestra en la Figura 2.14. Además de poder agregar widgets adicionales a esta ventana.

```

#Creación de ventana
ventana=Tk() #Creación de interfaz
ventana.title('Ciclo Otto de 4 cilindros') #Título a la ventana creada
ventana.geometry('990x650') #Dimensiones de la ventana

```

Figura 2.14 Creación de la ventana para la interfaz

Para una mejor visualización de la ventana, se procede a trabajar con “frames”, el cual es un widget, utilizado como contenedor dentro de otras ventanas o contenedores y sirve para contener widgets adicionales como, títulos, etiquetas, cuadros de texto, botones, etc.

Para la ventana creada se realiza la creación de dos “frames” (Figura 2.15), el primero ubicado en la parte izquierda, el cual será el contenedor de las variables de entrada, así como de los botones para la obtención de resultados numéricos y gráficos de ambos métodos. Mientras que el “frame” derecho, será el contenedor de los valores de salida de cada estado termodinámico y de las gráficas obtenidas a partir de estos valores numéricos. Estos “frames” al igual que la ventana principal, pueden ser configurados con ciertas características, tales como su tamaño, ubicación, relleno, color de fondo, etc.

```

#Creación de frames
frame1=Frame(ventana)
frame1.pack(side='left', fill='both', expand='True')
frame1.config(width='350', height='650', bd=10)

frame2=Frame(ventana)
frame2.pack(side='right', anchor='n', fill='both', expand='True')
frame2.config(width='640', height='650', bd=10)

```

Figura 2.15 Creación de "frames" para ingreso y salida de datos

Con los dos “frames” principales, se puede realizar varios contenedores dentro de los mismos, con el fin de obtener una estructura más organizada y con un mejor aspecto visual. Para el programa a desarrollar, se crea cuatro “frames” adicionales para el izquierdo, esto con el fin de tener más organizado el ingreso de variables de entrada en cuanto a la energía, exergía y entropía y los botones para obtener los resultados.

Dentro de cada contenedor se pueden ingresar otros widgets, tales como los mencionados anteriormente, los mismos que también pueden ser configurados, con el fin de obtener un aspecto visual idóneo, además, se permite cambiar el tipo de letra, tamaño, color, donde estará ubicada la etiqueta o botón, etc., esto se ve representado en Figura 2.16.

```

tit=Label(fm1, text='CICLO OTTO', fg='red', font=('Courier new', 20, 'bold', 'italic')) #Creación de frame y configuración
tit.grid(row=0, column=0, columnspan=4, ipadx=0.05, ipady=0.05) #Ubicación de frame

tit2=LabelFrame(fm2, text='Variables de ingreso', font=('Arial', 12, 'bold', 'italic'), fg='green', bd=5, relief=RIDGE) #Título del frame
tit2.grid(padx=20, pady=20) #Ubicación de título del frame

ret=Label(tit2, text="r", font=('Arial', 11, 'italic')) #Creación de ingreso de primera variable (relación de compresión "r")
ret.grid(row=2, column=0, padx=2, pady=1, ipadx=0.05, ipady=0.05) #Ubicación de frame
re=DoubleVar() #Definición de variable a ingresar
textre=Entry(tit2, font=('SimSum', 11), width=8, textvariable=re) #Cuadro de texto para ingreso de valor
textre.grid(row=2, column=1, padx=2, pady=1, ipadx=0.05, ipady=0.05) #Ubicación del cuadro de texto
textre.delete(0, END) #Eliminación de valor anterior para nuevo ingreso

```

Figura 2.16 Creación de “frame” y widgets dentro de un contenedor

Cabe mencionar que el widget “LabelFrame” permite la creación de un marco contenedor, el cual está diseñado para dar un mejor aspecto visual como contenedor de otros widgets dentro del mismo y así obtener una estructura más organizada.

Para poder obtener un enlace entre el botón creado y la programación realizada es necesario definir dichos cálculos numéricos mediante una función, para posteriormente enlazar la misma con el botón creado, mediante la función “command” tal como se muestra en la Figura 2.17.

```
def reset(): #Creación de función para botón "RESET"
    textre.delete(0,END)
    textTle.delete(0,END)
    textPle.delete(0,END)
    textVle.delete(0,END)
    textT3e.delete(0,END)
    textPatme.delete(0,END)
    textTambe.delete(0,END)

bt9=Button(tit2, text='RESET', command=reset, fg='red', font=('Arial', 10, 'italic')) #Creación y enlace parte numérica
bt9.grid(row=7, column=1, padx=5, pady=3, sticky='nsew', columnspan=1) #Configuración y ubicación
```

Figura 2.17 Creación de botones y enlace con programación numérica para botón “RESET”

Para el “frame” derecho de los resultados, se crea cinco “frames” adicionales, los mismos que están distribuidos de forma adecuada para que se pueda visualizar cada estado termodinámico por separado y los resultados en general del ciclo. A estos contenedores, al igual que en el caso izquierdo pueden ser configurados con varios widgets, como los mencionados previamente. La configuración es la misma, considerando que estos widgets entregarán datos y ya no los recibirán como se muestra en la Figura 2.16, un ejemplo de la programación realizada se muestra en la Figura 2.18 para el estado 2 y como variable de salida, la presión.

```
et31=LabelFrame(fr3, text='Estado 2', font=('Arial', 12, 'bold', 'italic'), fg='blue', bd=5, relief=RIDGE)
et31.grid(padx=5, pady=3)

et32=Label(et31, text='p2', font= ('Arial', 11, 'italic'), fg='blue')
et32.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=0)
et33=Label(et31, text=(round(P2/1000, 2)), font=('SimSum', 11), bg='white', width=9, relief='groove')
et33.grid(row=1, column=2, padx=10, pady=0)
et34=Label(et31, text="[kPa]", fg='#808080', font=('Courier new', 11, 'bold', 'italic'))
et34.grid(row=1, column=3, padx=10, pady=0)
```

Figura 2.18 Contenedor del estado dos con variable de salida de la presión

Los resultados arrojados por el programa muestran las propiedades de cada estado termodinámico, tales como: Presión (p), volumen específico (v), Temperatura (T), energía interna (u), entropía (s) y exergía (ϕ) para el método exacto. Para el método aproximado, se presenta las mismas propiedades exceptuando la entropía (s) y exergía (ϕ), mostrando líneas punteadas en estas propiedades. Además, se muestra los resultados generales del ciclo para ambos métodos, tales como: eficiencia (η), trabajo neto (w_{neto}), calor añadido (q_a), calor rechazado (q_r), presión media efectiva (PME), masa, y las variaciones de energía interna de estado a estado.

2.6 Obtención de ejecutable

Para la creación del ejecutable se realiza el empaquetamiento de la ventana y de las imágenes utilizadas en la creación de la interfaz gráfica, sin antes mencionar que el software desarrollado utiliza un logo, el mismo que es obtenido a partir de los gráficos desarrollados. Esto se muestra en la Figura 2.19.

```
# Empaquetar imágenes en archivo .exe
def resource_path(relative_path):
    try:
        base_path=sys._MEIPASS
    except Exception:
        base_path=os.path.abspath('.')

    return os.path.join(base_path,relative_path)

#Creación de ventana
ventana=Tk() #Creación de interfaz
ventana.title('Ciclo Otto') #Título a la ventana creada
ventana.geometry('990x650') #Dimensiones de la ventana
path=resource_path('logo.ico') #Empaquetamiento de logo
ventana.iconbitmap(path) #Adición de logo a programa
```

Figura 2.19 Empaquetar imágenes en archivo .exe

En el caso de adicionar imágenes dentro de la interfaz gráfica y para poder visualizar las mismas en el ejecutable, es necesario empaquetar la misma mediante la función “resource_path”, tal como se muestra en la Figura 2.20.

```
fmgr1=Frame(frame2,bg='white',width='450',height='220') #Para gráfica inicial
fmgr1.place(x=0,y=10)
fmgr1.config(bd=2)
fmgr1.config(relief='groove')
figura=plt.Figure(figsize=(5,3),dpi=75)
ax=figura.add_subplot()
imgn=resource_path('base pv6.png')
imagen=img.imread(imgn)
ax.imshow(imagen)
ax.axis('off')
line=FigureCanvasTkAgg(figura,fmgr1)
line.get_tk_widget().place(x=40,y=0)
```

Figura 2.20 Empaquetamiento de imagen del diagrama P-V

Una vez empaquetadas las imágenes, el logo y la ventana en general se procede a obtener el ejecutable con ayuda de la consola de nuestro computador. Una vez dentro de la consola, primero se debe ingresar a la carpeta donde se encuentra nuestro archivo “.py” con las imágenes y el ícono utilizadas en el programa, posteriormente, es necesario realizar la instalación del entorno virtual de Python, el cual permite el empaquetamiento de las imágenes e iconos utilizados, para ello en la consola se escribe el siguiente comando: “pip install virtual env”. Luego de instalar el entorno virtual es necesario activar el mismo, esto se lo realizando con el siguiente comando: “activate”. Después, para poder convertir el archivo .py a .exe es necesario instalar el pyinstaller mediante el siguiente comando: “pip install pyinstaller”. Posteriormente, es necesario realizar la instalación de las librerías externas utilizadas en el programa, siguiendo el mismo procedimiento descrito en

secciones anteriores. Finalmente, para obtener el ejecutable se realiza la instalación del auto py to exe, mediante el siguiente comando: “pip install auto-py-to-exe” y finalmente para mostrar la consola donde se puede obtener el ejecutable (Figura 2.21) se escribe en la consola de nuestro computador el siguiente comando: “auto-py-to-exe”, y se procede a completar los campos mostrados.

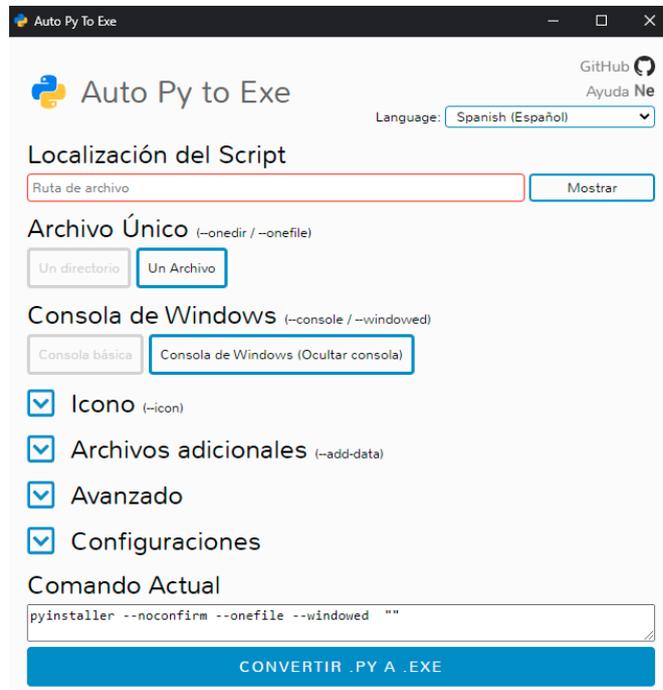


Figura 2.21 Consola para creación de ejecutable

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

El software desarrollado DT-Otto, es denominado de tal manera debido a que el mismo pertenece al grupo de diagramas termodinámicos (DT) y trabaja concretamente con el ciclo de potencia Otto.

El presente software permite obtener la representación gráfica del ciclo Otto mediante la innovación de los diagramas de energía, entropía y exergía, basada en la resolución numérica del ciclo por los métodos aproximado y exacto. Se lleva a cabo una comparación y comprobación de los resultados obtenidos por el software con el método analítico, la solución presentada por Cengel [2] y el programa TermoGraf, de tal manera que se obtiene un error relativo, permitiendo así validar la precisión y confiabilidad de los resultados. Cabe señalar que, para el método analítico, se toma en consideración las tablas termodinámicas del libro de Cengel [2]. Adicionalmente, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para la temperatura máxima (T_3) y la relación de compresión del ciclo (r), observando de forma numérica y gráfica cómo afectan estos parámetros al ciclo como tal.

Diagrama de energía (Método exacto)

En este diagrama se busca comparar la variación de energía interna (Δu), el calor añadido (q_a), el calor rechazado (q_r) y el trabajo de neto (w_{neto}).

En la Tabla 3.1 se puede visualizar la comparación de los resultados numéricos obtenidos por el software con el método analítico y el programa TermoGraf para el método exacto, tomando en consideración al problema planteado en la sección 2.2.

Tabla 3.1 Error relativo entre el software, el método analítico y el programa TermoGraf para valores de energía del ciclo Otto por el método exacto

Valores	RESULTADOS		
	DT-Otto exacto	Analítico exacto	TermoGraf exacto
q_a [kJ/kg]	1107.38	1109.75	1107.78
Error [%]	-	0.21	0.04
q_r [kJ/kg]	508.4	511.1	510.35
Error [%]	-	0.53	0.38
w_{neto} [kJ/kg]	598.98	598.65	597.43
Error [%]	-	0.06	0.26
Δu_{1-2} [kJ/kg]	320.86	319.32	319.45
Error [%]	-	0.48	0.44
Δu_{2-3} [kJ/kg]	1107.38	1109.75	1107.78

Error [%]	-	0.21	0.04
Δu_{3-4} [kJ/kg]	-919.84	-917.97	-916.88
Error [%]	-	0.2	0.32
Δu_{4-1} [kJ/kg]	-508.4	-511.1	-510.35
Error [%]	-	0.53	0.38

En la Figura 3.1 se observa el diagrama de energía desplegado por parte del software para el problema planteado y con resultados numéricos expresados en la Tabla 3.1.

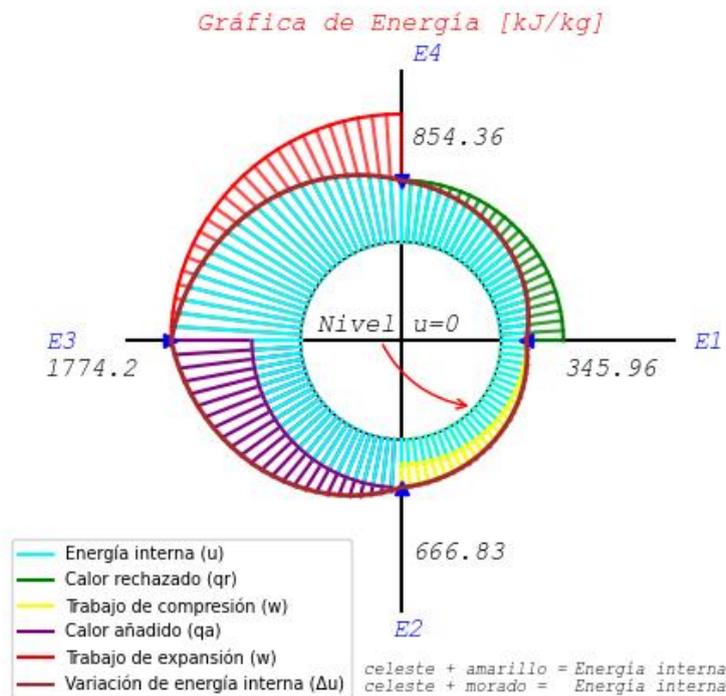


Figura 3.1 Diagrama de energía del ciclo Otto por el método exacto

Como se puede evidenciar en la Tabla 3.1 se tiene errores no tan significativos entre los resultados obtenidos por el programa y los obtenidos por la resolución analítica y TermoGraf, siendo el error más alto con un valor del 0.53% con respecto al programa y la solución analítica, es decir un valor menor al 1%, por lo que se evidencia la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos para el diagrama de energía.

Cabe señalar que se muestra la variación de energía interna, debido a que esta propiedad depende de la referencia utilizada, por lo que se realiza una comparación de la variación y no de los valores en sí mismos, esto se debe a que cada método de resolución, ya sea TermoGraf, resolución analítica o el software DT-Otto presentan un sistema de referencia único para realizar sus respectivos cálculos, por ende los resultados netos de esta propiedad en cada estado varían, sin embargo, independientemente de este valor la variación de energía interna de estado a estado debe ser similar, garantizando así que los resultados son correctos.

Por otro lado, la Figura 3.1 nos indica la variación de energía total del ciclo mediante la curva color café, partiendo desde la consideración que el círculo base tiene un nivel referencial de energía de cero. Sin embargo, se puede evidenciar que existen componentes energéticos por fuera de esta variación total, esto se debe a que los mismos no contribuyen a la adición de energía, en el caso de las líneas rojas, indican un trabajo de salida de expansión, mientras que las líneas verdes muestran el calor rechazado del ciclo, por otro lado, los componentes energéticos del primer y segundo cuadrante se encuentran dentro de esta curva, esto se debe a que los mismos contribuyen a la adición de energía, en el caso de las líneas amarillas, indican un trabajo de entrada por compresión, mientras que las líneas moradas muestran la adición de calor del ciclo, sin embargo, se destaca que la energía interna en el primer cuadrante está dado por la suma de las líneas color celeste y amarillo y para segundo cuadrante está representada por la sumatoria de las líneas color celeste más morado. Por otro lado, conforme se aporta energía al ciclo la energía interna aumenta, tal como se muestra en el primer y segundo cuadrante, mientras que en el tercer y cuarto cuadrante esta energía disminuye, debido a que sus componentes energéticos de trabajo de expansión y rechazo de calor no aportan al aumento de energía del ciclo.

La ejecución de este diagrama por parte del programa se muestra en el Anexo 1.

Diagrama de entropía (Método exacto)

En este diagrama se pretende comparar la variación de entropía de un estado a otro.

En la Tabla 3.2 se puede visualizar la comparación de los resultados numéricos obtenidos por el software con el programa TermoGraf para el método exacto, tomando en consideración al problema planteado en la sección 2.2.

Tabla 3.2 Error entre el software y el programa TermoGraf para valores de entropía del ciclo Otto

Valores	Resultados		
	DT-Otto exacto	TermoGraf exacto	Error [%]
$s_{1-2} [kJ/kg.K]$	0	0	0
$s_{2-3} [kJ/kg.K]$	0.87	0.87	0
$s_{3-4} [kJ/kg.K]$	0	0	0
$s_{4-1} [kJ/kg.K]$	0.87	0.87	0

En la Figura 3.2 se observa el diagrama de entropía desplegado por parte del software para el problema planteado y con resultados numéricos expresados en la Tabla 3.2.

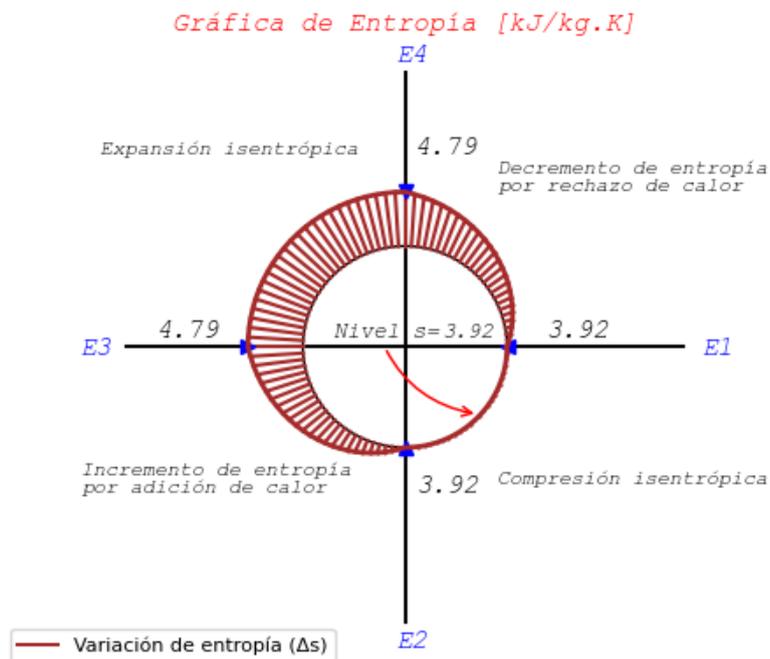


Figura 3.2 Diagrama de entropía del ciclo Otto por el método exacto

De la Tabla 3.2 se puede observar que no existe error entre los métodos de resolución comparados. Se decidió mostrar la variación de las entropías de un estado a otro, debido a que, el valor de la entropía depende de la referencia utilizada, por lo que se realiza la comparación en base a la variación y no en base a los valores en sí mismos, esto se debe a que cada uno de los métodos de resolución presentados tiene un sistema de referencia único por el cual se parte para su resolución numérica, por ende, existe una variación significativa de su valor neto en cada estado. Sin embargo, la variación de un estado a otro debe ser similar y en el mejor de los casos, la misma, garantizando así que los resultados son correctos.

En la Figura 3.2 se representa la variación de entropía de cada estado respecto a la de menor valor en el ciclo, siendo esta, la del estado uno, partiendo desde la consideración que el círculo base tiene un nivel referencial de entropía igual al valor del estado uno. Se consideró esta representación, por motivos de mejor visualización e interpretación, ya que, la gráfica de sus valores netos en cada estado mostraba un círculo, en el cual no se puede observar esta variación como tal, debido a que la misma es tan pequeña, por lo que es difícil de percibir a simple vista. Sin embargo, en la gráfica mostrada, se puede observar claramente cómo se da esta variación, además de poder identificar los estados donde la misma permanece constante, en este caso del estado uno al estado dos y del estado tres al estado cuatro.

La ejecución de este diagrama por parte del programa se muestra en el Anexo 2.

Diagrama de exergía (Método exacto)

En este diagrama se pretende comparar los valores de exergía de cada estado termodinámico del ciclo.

En la Tabla 3.3 se puede visualizar la comparación de los resultados numéricos obtenidos por el software con el programa TermoGraf para el método exacto, tomando en consideración al problema planteado en la sección 2.2.

Tabla 3.3 Error entre el software y el programa TermoGraf para valores de exergía del ciclo Otto

Valores	Resultados		
	DT-Otto exacto	TermoGraf exacto	Error [%]
ϕ_1 [kJ/kg]	2.23	2.24	0.45
ϕ_2 [kJ/kg]	262.99	261.57	0.54
ϕ_3 [kJ/kg]	1115.42	1113.87	0.14
ϕ_4 [kJ/kg]	255.69	257.11	0.55

En la Figura 3.3 se observa el diagrama de entropía desplegado por parte del software para el problema planteado y con resultados numéricos expresados en la Tabla 3.3.

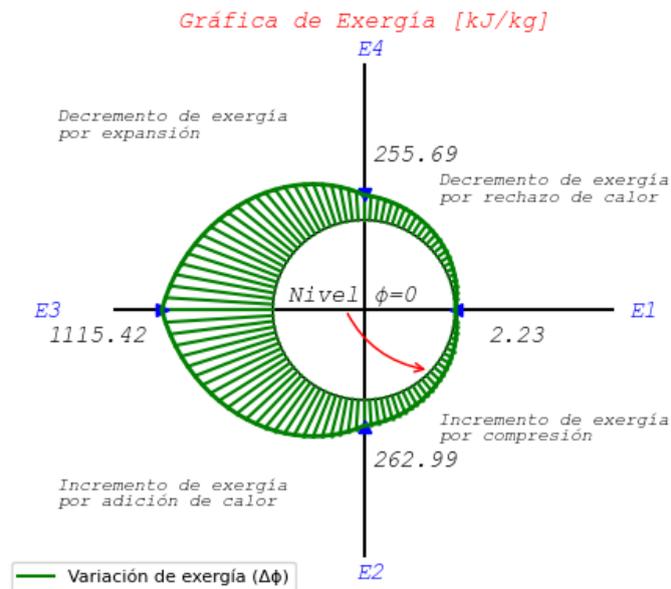


Figura 3.3 Diagrama de exergía del ciclo Otto por el método exacto

De la Tabla 3.3 se puede observar que no existe error significativo entre los métodos de resolución comparados, siendo el error más alto con un valor del 0.55%, es decir un valor menor al 1%, evidenciando la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos para el

diagrama de exergía.

En la Figura 3.3 se representa la variación de exergía del ciclo, partiendo desde la consideración que el círculo base tiene un nivel referencial de exergía de cero. De los estados mostrados, se puede evidenciar que la exergía aumenta en el estado uno a dos debido a la compresión isentrópica ya que se aprovecha el trabajo producido para aumentar esta propiedad, igualmente, del estado dos al estado tres existe un aumento de la misma, esto debido a la adición de calor, y en el cual se puede evidenciar que el aumento es significativo y considerable, sin embargo, del estado tres al estado cuatro existe una disminución de exergía debido al trabajo realizado por la expansión isentrópica. Cabe señalar que en todas estas variaciones de estado no se está destruyendo exergía (potencial de trabajo perdido), sin embargo, del estado cuatro al estado uno existe destrucción de exergía debido a que en dicho proceso ya no se requiere de una adición, sino que se requiere expulsar a la misma ya que es exergía sobrante de todo el proceso, la cual es rechazada en forma de calor.

La ejecución de este diagrama por parte del programa se muestra en el Anexo 3.

Diagrama de energía (Método aproximado)

En este diagrama se busca comparar la variación de energía interna (Δu), el calor añadido (q_a), el calor rechazado (q_r) y el trabajo de neto (w_{neto}).

En la Tabla 3.4 se puede visualizar la comparación de los resultados numéricos obtenidos por el software con el método analítico y los cálculos presentados por Cengel para el método aproximado, tomando en consideración al problema planteado en la sección 2.2.

Tabla 3.4 Error entre el software, el método analítico y Cengel para valores de energía del ciclo Otto

Valores	RESULTADOS		
	DT-Otto aproximado	Analítico aproximado	Cengel aproximado
q_a [kJ/kg]	869.53	869.53	869.18
Error [%]	-	0	0.04
q_r [kJ/kg]	353.34	353.35	353.56
Error [%]	-	0.003	0.06
w_{neto} [kJ/kg]	516.19	516.18	515.62
Error [%]	-	0.002	0.11
Δu_{1-2} [kJ/kg]	323.06	323.06	323.03
Error [%]	-	0	0.01
Δu_{2-3} [kJ/kg]	869.53	869.53	869.53
Error [%]	-	0	0,00

$\Delta u_{3-4} [kJ/kg]$	-839.35	-839.35	-839.25
Error [%]	-	0	0.01
$\Delta u_{4-1} [kJ/kg]$	-353.34	-353.34	-353.35
Error [%]	-	0	0.003

En la Figura 3.4 se observa el diagrama de energía desplegado por parte del software para el problema planteado y con resultados numéricos expresados en la Tabla 3.4.

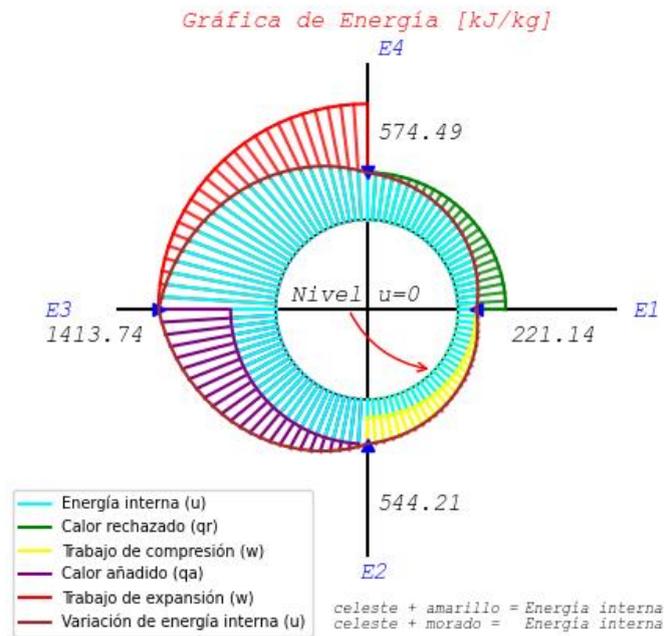


Figura 3.4 Diagrama de energía del ciclo Otto por el método aproximado

Como se puede evidenciar en la Tabla 3.4 se tiene errores no tan significativos entre los resultados obtenidos por el programa y los obtenidos por la resolución analítica y los presentados por Cengel, siendo el error más alto con un valor del 0.11% con respecto al programa y Cengel, es decir errores menores al 1%, evidenciando la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos para el diagrama de energía por el método aproximado.

Por otro lado, la Figura 3.4 nos indica la variación de energía total de un estado a otro mediante la curva color café, partiendo desde la consideración que el círculo base tiene un nivel referencial de energía de cero. Cabe señalar, que el análisis de este diagrama es similar al presentado por el método exacto, sin embargo, en este método de resolución se tiene una variación en los valores mostrados, pues como su nombre lo indica, es un método aproximado. De tal forma que, los resultados presentados difieren en cierto valor en comparación al método exacto, por lo que existe una diferencia en el rendimiento del ciclo comparando ambos métodos.

La ejecución de este diagrama por parte del programa se muestra en el Anexo 4.

Análisis de sensibilidad para la temperatura máxima (T_3)

Para el análisis de sensibilidad de la temperatura máxima se consideró variar la misma para dos valores, los mismos que fueron considerados con relación a un rango de valores reales, tomando como referencia los datos base del problema planteado en la sección 2.2. En la Tabla 3.5 se puede observar los datos del problema base y las temperaturas máximas consideradas para su análisis.

Tabla 3.5 Datos del problema base y temperatura máxima

Datos problema base	Temperatura máxima
$r = 9.5$	
$T_1 = 308 K$	$T_3 = 1400 K$
$P_1 = 100 kPa$	$T_3 = 1700 K$
$V_1 = 600 cm^3$	

En la Tabla 3.6 se muestra cómo se afecta a los parámetros del ciclo las temperaturas máximas consideradas.

Tabla 3.6 Análisis de sensibilidad para la temperatura máxima (T_3)

	Parámetros del ciclo	Temperatura máxima		Tendencia
		1400 [K]	1700 [K]	
Energía exacto	$q_a [kJ/kg]$	572.36	851.11	Aumento
	$q_r [kJ/kg]$	252.77	348.25	Aumento
	$W_{neto} [kJ/kg]$	319.59	466.86	Aumento
	$u_1 [kJ/kg]$	345.96	345.96	Neutro
	$u_2 [kJ/kg]$	666.83	666.83	Neutro
	$u_3 [kJ/kg]$	1239.18	1517.93	Aumento
	$u_4 [kJ/kg]$	598.73	730.21	Aumento
	$\eta [\%]$	55.84	54.85	Disminución
Entropía	$s_1 [kJ/kg]$	3.92	3.92	Neutro
	$s_2 [kJ/kg]$	3.92	3.92	Neutro
	$s_3 [kJ/kg]$	4.47	4.65	Aumento
	$s_4 [kJ/kg]$	4.47	4.65	Aumento
Exergía	$\phi_1 [kJ/kg]$	2.23	2.23	Neutro
	$\phi_2 [kJ/kg]$	262.99	262.99	Neutro
	$\phi_3 [kJ/kg]$	674.23	900.15	Aumento
	$\phi_4 [kJ/kg]$	93.89	172.53	Aumento

De manera conjunta entre la Tabla 3.6 y la Figura 3.7, se puede observar que a medida que existe un aumento en la temperatura máxima, no existe una variación en la exergía obtenida para los estados uno y dos, mientras que para los estados tres y cuatro si existe un aumento de exergía, debido a la relación directa de esta propiedad con estos estados, evidenciando un aumento de la exergía conforme aumenta la temperatura máxima.

Análisis de sensibilidad para la relación de compresión (r)

Para el análisis de sensibilidad de la relación de compresión se consideró variar la misma para dos valores, el primer valor para la menor relación de compresión y el segundo valor, para el valor máximo según las consideraciones actuales para este ciclo, considerando los datos base del problema planteado en la sección 2.2.

En la Tabla 3.7 se puede observar los datos del problema base y las relaciones de compresión consideradas para su análisis.

Tabla 3.7 Datos del problema base y relación de compresión

Datos problema base	Temperatura alta
$T_1 = 308 K$	$r = 8$ $r = 11$
$P_1 = 100 kPa$	
$V_1 = 600 cm^3$	
$T_3 = 1969 K$	

En la Tabla 3.8 se muestra cómo se afecta a los parámetros del ciclo las relaciones de compresión consideradas.

Tabla 3.8 Análisis de sensibilidad para la relación de compresión

	Parámetros del ciclo	Relación de compresión (r)		Tendencia
		8	11	
Energía exacto	$q_a [kJ/kg]$	1142.92	1075.19	Disminución
	$q_r [kJ/kg]$	557.86	468.37	Disminución
	$W_{neto} [kJ/kg]$	585.05	606.82	Aumento
	$u_1 [kJ/kg]$	345.96	345.96	Neutro
	$u_2 [kJ/kg]$	631.33	698.98	Aumento
	$u_3 [kJ/kg]$	1774.24	1774.16	Neutro
	$u_4 [kJ/kg]$	903.83	814.33	Disminución
	$\eta [\%]$	51.19	56.44	Aumento

Entropía	$s_1[kJ/kg]$	3.92	3.92	Neutro
	$s_2[kJ/kg]$	3.92	3.92	Neutro
	$s_3[kJ/kg]$	4.84	4.74	Disminución
	$s_4[kJ/kg]$	4.84	4.74	Disminución
Exergía	$\phi_1[kJ/kg]$	2.23	2.23	Neutro
	$\phi_2[kJ/kg]$	228.82	294.18	Aumento
	$\phi_3[kJ/kg]$	1102.19	1126.9	Aumento
	$\phi_4[kJ/kg]$	290.55	228.14	Disminución
Energía aproximado	$q_a[kJ/kg]$	905.69	836.67	Disminución
	$q_r[kJ/kg]$	394.22	320.62	Disminución
	$W_{neto}[kJ/kg]$	511.46	516.04	Aumento
	$u_1[kJ/kg]$	221.14	221.14	Neutro
	$u_2[kJ/kg]$	508.06	577.07	Aumento
	$u_3[kJ/kg]$	1413.74	1413.74	Neutro
	$u_4[kJ/kg]$	615.37	541.77	Disminución
	$\eta [\%]$	56.47	61.68	Aumento

En la Figura 3.8, Figura 3.9 y Figura 3.10, se muestra la comparación gráfica de la relación de compresión de 8 y 11 para los diagramas de energía, entropía y exergía respectivamente.

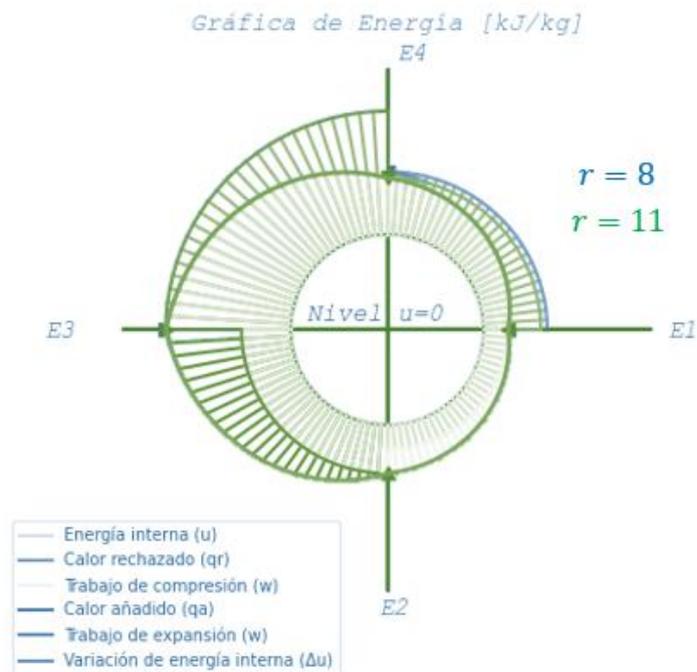


Figura 3.8 Comparación de energía para variación de relación de compresión

De manera conjunta entre la Tabla 3.8 y la Figura 3.8, se puede observar que a medida que existe un aumento en relación de compresión, existe una disminución del calor añadido

y el calor rechazado, mientras el trabajo neto aumenta. Por otro lado, se puede evidenciar que, las energías internas de los estados uno y tres no varían, debido a que la relación de compresión solo afecta directamente al estado dos y cuatro, ya que estos estados termodinámicos no fueron considerados en las variables de entrada, dependiendo netamente de la relación de compresión utilizada, por lo que se evidencia un aumento y disminución respectivamente, esto ocurre para ambos métodos de solución.

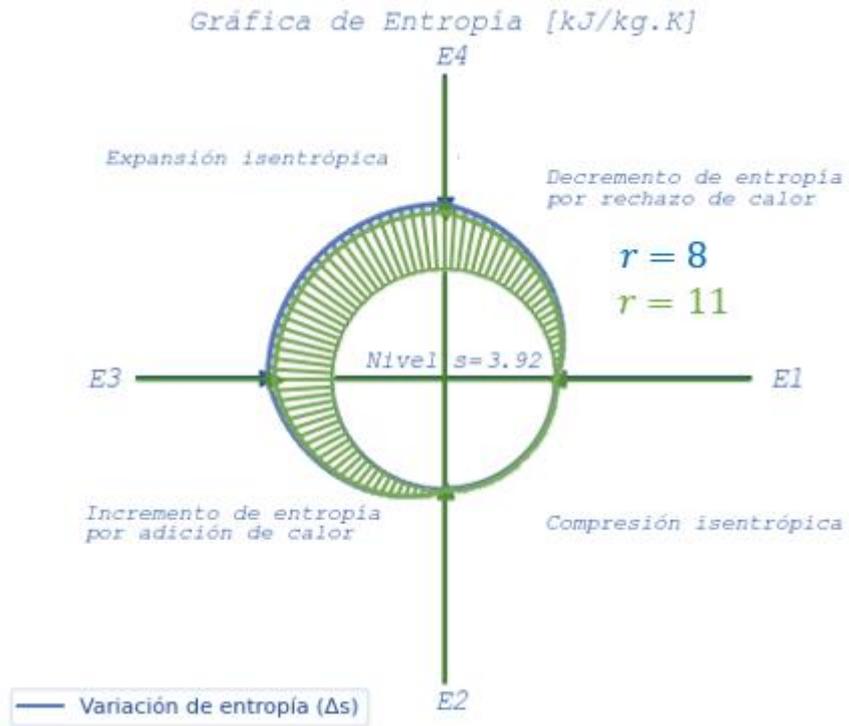


Figura 3.9 Comparación de entropía para variación de relación de compresión

De manera conjunta entre la Tabla 3.8 y la Figura 3.9, se puede observar que a medida que existe un aumento en la relación de compresión se tiene una disminución de la entropía para los estados tres y cuatro. A pesar de que la temperatura máxima permanezca constante como parámetro de entrada, el rendimiento del ciclo en general aumenta, debido a la disminución del calor añadido y aumento del trabajo neto, con lo cual se indica que el desenvolvimiento del ciclo es correcto.

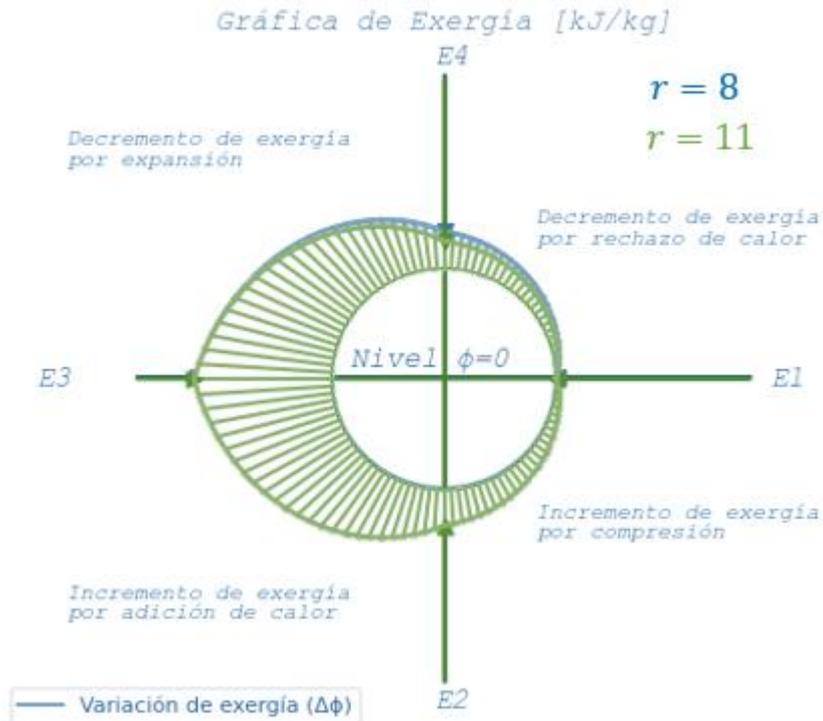


Figura 3.10 Comparación de exergía para variación de relación de compresión

De manera conjunta entre la Tabla 3.8 y la Figura 3.10, se puede observar que a medida que existe un aumento en relación de compresión, no existe una variación en la exergía obtenida para los estados uno y tres, mientras que para los estados dos y cuatro existe un aumento y disminución de exergía respectivamente, debido a que estos estados termodinámicos no fueron considerados en las variables de entrada, lo cual es lógico y tiene concordancia con el desenvolvimiento del ciclo.

Análisis de sensibilidad para la temperatura máxima (T_3) y la relación de compresión (r)

Adicionalmente se presenta un análisis de sensibilidad variando la relación de compresión (r) y la temperatura máxima (T_3) tratando de mantener constante el calor añadido (en una combinación entre (r) y (T_3)), con el fin de poder visualizar el comportamiento del ciclo.

Para este análisis se considera valores iniciales de (r) y (T_3), posteriormente se varía los mismos hasta mantener un calor añadido lo más cercano posible al obtenido para los valores iniciales, considerando los datos base del problema planteado en la sección 2.2.

En la Tabla 3.9 se puede observar los datos del problema base y las relaciones de compresión y temperaturas máximas para su análisis.

Tabla 3.9 Datos del problema base, relación de compresión y temperatura máxima

Datos problema base	Temperatura alta
$T_1 = 308 K$	$r = 8 \quad T_3 = 1600$
$P_1 = 100 kPa$	$r = 11 \quad T_3 = 1672.34$
$V_1 = 600 cm^3$	
$T_3 = 1969 K$	

En la Tabla 3.10 se muestra cómo se afecta a los parámetros del ciclo para las temperaturas altas consideradas.

Tabla 3.10 Análisis de sensibilidad para la relación de compresión y temperatura máxima

	Parámetros del ciclo	Valores considerados		Tendencia
		$r = 8$ $T_3 = 1600$	$r = 11$ $T_3 = 1672.34$	
Energía exacto	$q_a [kJ/kg]$	792.84	792.84	Neutro
	$q_r [kJ/kg]$	378.55	338.62	Disminución
	$W_{neto} [kJ/kg]$	414.28	454.22	Aumento
	$u_1 [kJ/kg]$	345.96	345.96	Neutro
	$u_2 [kJ/kg]$	631.33	698.98	Aumento
	$u_3 [kJ/kg]$	1424.16	1491.82	Aumento
	$u_4 [kJ/kg]$	724.52	684.59	Disminución
	$\eta [\%]$	52.25	57.29	Aumento
Entropía	$s_1 [kJ/kg]$	3.92	3.92	Neutro
	$s_2 [kJ/kg]$	3.92	3.92	Neutro
	$s_3 [kJ/kg]$	4.64	4.59	Disminución
	$s_4 [kJ/kg]$	4.64	4.59	Disminución
Exergía	$\phi_1 [kJ/kg]$	2.23	2.23	Neutro
	$\phi_2 [kJ/kg]$	228.82	294.18	Aumento
	$\phi_3 [kJ/kg]$	809.76	890.08	Aumento
	$\phi_4 [kJ/kg]$	168.9	143.92	Disminución
Energía aproximado	$q_a [kJ/kg]$	640.74	623.67	Disminución
	$q_r [kJ/kg]$	278.9	239.0	Disminución
	$W_{neto} [kJ/kg]$	361.84	384.67	Aumento
	$u_1 [kJ/kg]$	221.14	221.14	Neutro
	$u_2 [kJ/kg]$	508.06	577.07	Aumento

	$u_3[kJ/kg]$	1148.8	1200.74	Aumento
	$u_4[kJ/kg]$	500.04	460.14	Disminución
	η [%]	56.47	61.68	Aumento

La Tabla 3.10 muestra los valores numéricos obtenidos al variar la relación de compresión y la temperatura máxima, con lo cual, para el análisis de energía muestra que el calor rechazado disminuye, mientras que el trabajo neto aumenta. Por otro lado, la energía interna del estado uno permanece constante, mientras existe un aumento de esta propiedad para los estados dos y tres y una disminución para el estado cuatro, todo esto está acorde al aumento tanto de la relación de compresión como la temperatura máxima, pues el estado uno ya está definido completamente, por lo que el resto de los estados termodinámicos se ven afectados por estas dos variables de entrada.

Para el análisis de entropía se puede evidenciar que existe una disminución de la misma, para los estados dos y tres, conforme aumenta las propiedades consideradas para el análisis, esto se debe a que, al variar la temperatura máxima y la relación de compresión, se ven afectados estos dos estados termodinámicos.

Para el análisis de exergía se evidencia que existe un aumento de esta propiedad para los estados dos y tres, mientras que para el estado cuatro, esta propiedad disminuye, indicando que conforme se aumente estas dos propiedades el potencial perdido (exergía destruida) es menor, aprovechando más la exergía en el resto del ciclo.

Para el análisis de energía por el método aproximado se indica que existe una disminución del calor añadido y rechazado, mientras que el trabajo neto aumenta. Sin embargo, para los estados dos y tres, existe un aumento de la energía interna, mientras que para el estado cuatro existe una disminución de esta propiedad. Además, cabe señalar que existe un aumento de la eficiencia del ciclo en general, debido a la disminución del calor rechazado y aumento del trabajo neto, por ambos métodos de resolución.

3.2 Conclusiones

El software desarrollado DT-Otto cumple con el objetivo principal de obtener los diagramas termodinámicos de energía, entropía y exergía asociados al ciclo de potencia Otto, con la mezcla aire-combustible como gas ideal, y, por lo tanto, como fluido de trabajo, por los métodos aproximado y exacto.

La información recopilada permite identificar que existen varios softwares para la resolución del ciclo de potencia Otto, sin embargo, los mismos se centran en la parte numérica, dejando de lado la parte gráfica del ciclo, de esta forma el software desarrollado en este proyecto de Integración constituye una herramienta innovadora y versátil para la resolución

y visualización de los parámetros involucrados en este ciclo.

Se identifica que el lenguaje de programación Python resulta ser apropiado para el desarrollo tanto numérico como gráfico del ciclo Otto, debido a la accesibilidad del mismo, así como su facilidad de manejo y uso en el desarrollo de programas e interfaces gráficas. El software desarrollado resuelve el ciclo de potencia Otto por los métodos aproximado y exacto, obteniendo las propiedades de cada estado termodinámico y los parámetros propios del ciclo. Para mostrar su precisión y confiabilidad, se realiza los cálculos para un ejemplo tomado del libro de Cengel y se compara los mismos con la solución analítica desarrollada por el estudiante, los resultados presentados por Cengel y el software TermoGraf, obteniéndose errores relativos, los cuales no fueron significativos, por lo que se demuestra la precisión y confiabilidad del software DT-Otto.

Las gráficas obtenidas se desarrollan y conceptualizan por parte de los autores del Trabajo de Integración Curricular, debido a que no existe una referencia inicial para este tipo de diagramas, por lo tanto, se busca una representación apropiada del ciclo que, de lugar a una fácil interpretación de las mismas, partiendo de la consideración de que los resultados obtenidos en la parte numérica están correctamente validados.

La interactividad del software permite al usuario modificar una o más variables de entrada, por lo tanto, se puede realizar un análisis numérico y gráfico de cómo afectan estas variables a las propiedades de cada estado termodinámico y a los diagramas presentados. Es decir, permite realizar un análisis de sensibilidad de una o más variables de forma numérica y gráfica.

El software desarrollado cuenta con un manual de usuario, en donde se indica cómo se debe proceder para obtener los diagramas propuestos por ambos métodos de solución. Además, de presentar las consideraciones necesarias para la ejecución del software sin que se presente un mensaje de alerta. Cabe señalar que no requiere de instalación, debido a que realiza un ejecutable, de forma que el usuario solo debe abrir el mismo y trabajar de forma inmediata.

Al analizar los diagramas de energía (Figura 3.1 y Figura 3.4) la variación de energía de un estado a otro está representada de forma angular por una curva café, donde el valor de energía interna se ve incrementado ya sea por la entrada de calor o trabajo, como ocurre en el primer y segundo cuadrante, y se ve disminuido ya sea por la salida de calor o trabajo, como ocurre en tercero y cuarto cuadrante. La entrada de energía en forma de calor o trabajo queda en el lado interno de esta línea café, en tanto que la salida de energía queda en la parte externa de la curva.

Es conocido que el valor de energía interna y la entropía depende de la referencia utilizada, por lo que para realizar la comparación se requiere hacerlo en base a la variación de los valores y no en base a los valores en sí mismos. Las comparaciones se realizan entre los resultados del software, la solución analítica, la solución presentada por Cengel y la resolución de TermoGraf.

Al analizar el diagrama de entropía para el método exacto (Figura 3.2) se puede evidenciar que existe una variación pequeña de la misma a lo largo del ciclo, por ello se realiza la representación gráfica de la variación de la entropía de cada estado respecto a la entropía uno, para lo cual ya no se considera un nivel referencial de cero, esto con la finalidad de amplificar apropiadamente estos pequeños cambios de entropía en el ciclo.

Al analizar el diagrama de exergía para el método exacto (Figura 3.3) se puede evidenciar que existe un aumento de esta propiedad conforme se avanza de estado a estado, hasta la temperatura máxima, luego la misma decrece hasta su estado inicial, sin embargo, cabe señalar que en este diagrama, la exergía destruida únicamente aparece en la variación del estado cuatro al estado uno, esto se debe que en el resto de estados se aprovecha cada proceso para la adición de exergía, exceptuando la variación del estado tres al estado cuatro, donde disminuye, sin embargo, es una exergía utilizada, pues se sigue aprovechando la misma para el desarrollo del ciclo.

El diagrama de energía para el método aproximado (Figura 3.4) muestra la misma tendencia que el método exacto, pero como su nombre indica, es una solución aproximada, por lo que sus valores varían en consideración al método exacto, existiendo una disminución de los mismos. Sin embargo, la solución está acorde al desarrollo del ciclo, por lo que es una solución válida.

El análisis de sensibilidad de la temperatura máxima (T_3) al aumentar su valor, indica que existe un aumento de las propiedades en los estados tres y cuatro, en donde esta variable de entrada tiene relación directa, por lo que en los estados uno y dos, no existe una variación en sus propiedades, sin embargo, el rendimiento del ciclo disminuye, debido al aumento del calor añadido y trabajo neto, por lo que se puede deducir que aumentar este parámetro afectará negativamente al desenvolvimiento del motor en la vida cotidiana.

El análisis de sensibilidad de la relación de compresión (r) al aumentar su valor, indica que existe una disminución del calor añadido y calor rechazado, mientras el trabajo neto aumenta, sin embargo, se puede evidenciar un aumento de la eficiencia. Por otro lado, el aumento y disminución de las propiedades en cada estado termodinámico, depende de cómo afecta la relación de compresión a dichos estados, tal es el caso del estado dos y

cuatro, donde al no estar definidos en las variables de entrada, son susceptibles a la dependencia de la relación de compresión y por ende una variación de los mismos.

El análisis de sensibilidad se puede realizar a las diversas variables de entrada, sin embargo, se consideró las propiedades mencionadas debido a que las mismas tienen mayor repercusión en el ciclo. Además, se puede realizar un análisis al variar dos o más variables de entrada, tal como se indica en el tercer análisis de sensibilidad, en donde se puede evidenciar cómo se ve afectado cada estado termodinámico del ciclo, así como su rendimiento.

3.3 Recomendaciones

Revisar las bases teóricas del ciclo Otto para la utilización del software, además de tomar en cuenta el manual de usuario proporcionado, con el fin de tener presente las consideraciones realizadas para la ejecución correcta del programa, de tal forma que no se arroje algún mensaje de error.

Se recomienda implementar diagramas termodinámicos complementarios que faciliten la interpretación e interacción de los diagramas obtenidos, tal es el caso del diagrama T-s para el diagrama de entropía, permitiendo así observar de manera directa esta variación en el ciclo y de esta manera obtener una mejor comprensión del diagrama.

Utilizar funciones en el desarrollo del programa, de tal manera que se pueda obtener un diagrama más simplificado y que permita realizar cambios de manera más rápida y eficaz, Además, se incita a realizar un código de programación bastante ordenado para facilitar los posibles cambios posteriores.

Se recomienda el uso de frames en la interfaz gráfica, esto permite al usuario obtener una estructura más organizada y fácil de asimilar para el usuario. Además, se incita al uso de Tkinter para el desarrollo de interfaces gráficas más elaboradas ya que esta herramienta contiene una amplia gama de funciones, las cuales permiten obtener ventanas más complejas.

Se recomienda al usuario ingresar todas las variables de entrada, las cuales deben ser valores numéricos, de tal manera que el software se ejecute sin problema alguno.

Revisar la información proporcionada para la interpretación de los diagramas obtenidos, ya que los mismos fueron conceptualizados y elaborados por parte del tutor y los estudiantes involucrados en el Trabajo de Integración Curricular, debido a la inexistencia de diagramas base, por lo que es necesario tener en cuenta cómo se realiza esta interpretación.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. García, “Desarrollo de una herramienta didáctica para el análisis de ciclos termodinámicos ideales,” Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez, 2019.
- [2] Y. Cengel, M. Boles, and M. Kanoglu, *Thermodynamics*, 9th ed., vol. 3. New York: McGraw-Hill Education, 2019.
- [3] J. Agüera, *Termodinámica lógica y motores térmicos*, 6th ed. España: Ciencia 3, S. L., 1999.
- [4] M. Zurita, “Creación de un software didáctico para el reconocimiento de las prácticas de motores diesel y gasolina en el Laboratorio de Termodinámica de Ingeniería Mecánica,” Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [5] D. Erazo and A. Viteri, “Análisis Termodinámico de los parámetros indicados de un motor de ciclo de aspiración natural con sistema de inyección electrónica en función de la altitud sobre el nivel del mar,” Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [6] R. Stone, *Introduction to Internal Combustion Engines*, 3rd ed. London: MACMILLAN PRESS LTD, 1999.
- [7] J. Shipman, “Tkinter 8.5 reference: a GUI for Python,” *New Mex. Tech Comput. Cent.*, pp. 1–168, 2013.
- [8] J. Rodríguez, “Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería,” Buenos Aires, 2020. doi: 10.15304/9788417595746.
- [9] T. Gómez, “Termodinámica,” Navarra, 2005.
- [10] I. Rivera, “Análisis exergético a un motor de combustión interna Otto.,” Instituto Politécnico Nacional, 2002.
- [11] C. Severance, “Python para todos,” *Web B.*, no. 6, pp. 1–262, 2013, [Online]. Available: <http://dspace.universia.net/handle/2024/919>.
- [12] M. Morillo, “Diagramas termodinámicos interactivos del ciclo Rankine simple,” Escuela Politécnica Nacional, 2022.
- [13] J. Silva, “Diagramas termodinámicos interactivos ciclo de refrigeración por compresión de vapor,” Escuela Politécnica Nacional, 2022.

5 ANEXOS

ANEXO I. Programa realizado para diagrama de energía por el método exacto

Ciclo Otto

— □ ×

CICLO OTTO

Variables de entrada

r 9.5
 $T1$ 308 K
 $p1$ 100000 Pa **EJEMPLO**
 $v1$ 600 cm^3
 $T3$ 1969 K

RESET

Datos para cálculo de exergía

P_{amb} 76000 Pa
 T_{amb} 293 K

Métodos de resolución

Método exacto

Energía

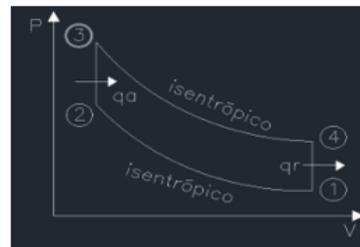
Entropía

Exergía

Método aproximado

Energía

[Acercar de DT_Otto](#)



Resultados:

Estado 1 (E1)

$p1$	100.0	[kPa]
$v1$	0.8839	[m^3/kg]
$T1$	308.0	[K]
$s1$	3.92	[kJ/kg.K]
$u1$	345.96	[kJ/kg]
$\phi1$	2.23	[kJ/kg]

Estado 2 (E2)

$p2$	2292.78	[kPa]
$v2$	0.093	[m^3/kg]
$T2$	737.0	[K]
$s2$	3.92	[kJ/kg.K]
$u2$	666.83	[kJ/kg]
$\phi2$	262.99	[kJ/kg]

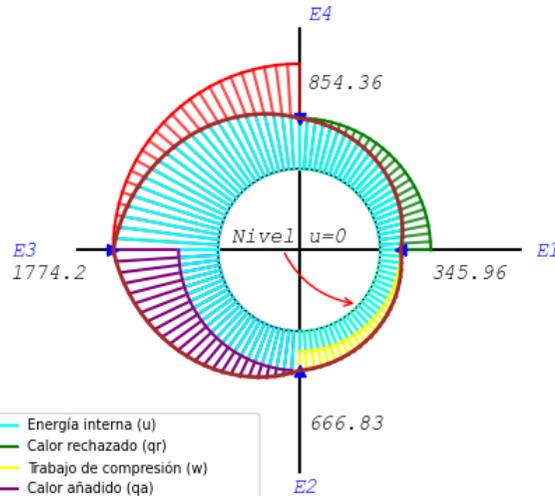
Estado 3 (E3)

$p3$	6141.26	[kPa]
$v3$	0.093	[m^3/kg]
$T3$	1969.0	[K]
$s3$	4.79	[kJ/kg.K]
$u3$	1774.2	[kJ/kg]
$\phi3$	1115.42	[kJ/kg]

Estado 4 (E4)

$p4$	313.25	[kPa]
$v4$	0.8839	[m^3/kg]
$T4$	963.61	[K]
$s4$	4.79	[kJ/kg.K]
$u4$	854.36	[kJ/kg]
$\phi4$	255.69	[kJ/kg]

Gráfica de Energía [kJ/kg]



— Energía interna (u)
— Calor rechazado (qr)
— Trabajo de compresión (w)
— Calor añadido (qa)
— Trabajo de expansión (w)
— Variación de energía interna (Δu)

celeste + amarillo = Energía interna
 celeste + morado = Energía interna

Resultados del ciclo en general

η	54.09	[%]	$\Delta u12$	320.86	[kJ/kg]
w_{neto}	598.98	[kJ/kg]	$\Delta u23$	1107.38	[kJ/kg]
q_a	1107.38	[kJ/kg]	$\Delta u34$	-919.84	[kJ/kg]
q_r	508.4	[kJ/kg]	$\Delta u41$	-508.4	[kJ/kg]
PME	757.38	[kPa]	masa	0.00068	[kg]

Método utilizado:

MÉTODO EXACTO

ANEXO II. Programa realizado para diagrama de entropía por el método exacto

Ciclo Otto

CICLO OTTO

Variables de entrada

r 9.5
 $T1$ 308 K
 $p1$ 100000 Pa **EJEMPLO**
 $V1$ 600 cm^3
 $T3$ 1969 K

RESET

Datos para cálculo de exergía

$Pamb$ 76000 Pa
 $Tamb$ 293 K

Métodos de resolución

Método exacto

Energía

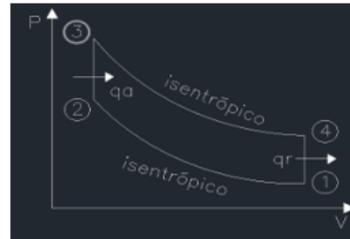
Entropía

Exergía

Método aproximado

Energía

Acerca de DT_Otto



Resultados:

Estado 1 (E1)

$p1$ 100.0 [kPa]
 $v1$ 0.8839 [m^3/kg]
 $T1$ 308.0 [K]
 $s1$ 3.92 [kJ/kg.K]
 $u1$ 345.96 [kJ/kg]
 $\phi1$ 2.23 [kJ/kg]

Estado 2 (E2)

$p2$ 2292.78 [kPa]
 $v2$ 0.093 [m^3/kg]
 $T2$ 737.0 [K]
 $s2$ 3.92 [kJ/kg.K]
 $u2$ 666.83 [kJ/kg]
 $\phi2$ 262.99 [kJ/kg]

Estado 3 (E3)

$p3$ 6141.26 [kPa]
 $v3$ 0.093 [m^3/kg]
 $T3$ 1969.0 [K]
 $s3$ 4.79 [kJ/kg.K]
 $u3$ 1774.2 [kJ/kg]
 $\phi3$ 1115.42 [kJ/kg]

Estado 4 (E4)

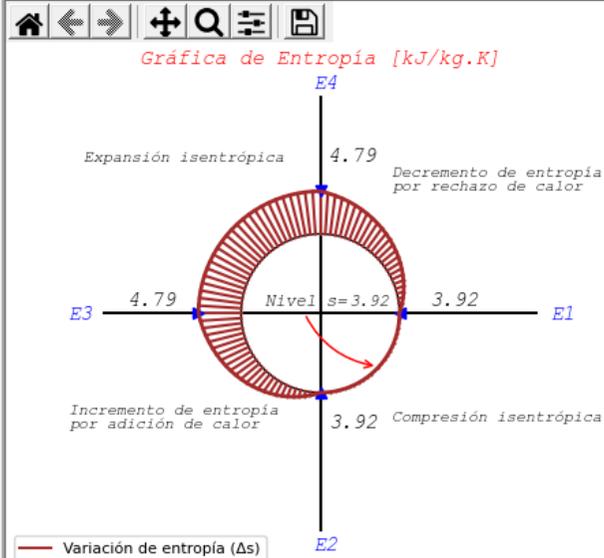
$p4$ 313.25 [kPa]
 $v4$ 0.8839 [m^3/kg]
 $T4$ 963.61 [K]
 $s4$ 4.79 [kJ/kg.K]
 $u4$ 854.36 [kJ/kg]
 $\phi4$ 255.69 [kJ/kg]

Resultados del ciclo en general

η 54.09 [%] $\Delta u12$ 320.86 [kJ/kg]
 w_{neto} 598.98 [kJ/kg] $\Delta u23$ 1107.38 [kJ/kg]
 q_a 1107.38 [kJ/kg] $\Delta u34$ -919.84 [kJ/kg]
 q_r 508.4 [kJ/kg] $\Delta u41$ -508.4 [kJ/kg]
 PME 757.38 [kPa] $masa$ 0.00068 [kg]

Método utilizado:

MÉTODO EXACTO



ANEXO III. Programa realizado para diagrama de exergía por el método exacto

Ciclo Otto

— □ ×

CICLO OTTO

Variables de entrada

r 9.5
 $T1$ 308 K
 $p1$ 100000 Pa **EJEMPLO**
 $v1$ 600 cm³
 $T3$ 1969 K

Datos para cálculo de exergía

$Pamb$ 76000 Pa
 $Tamb$ 293 K

Métodos de resolución

Método exacto

Energía

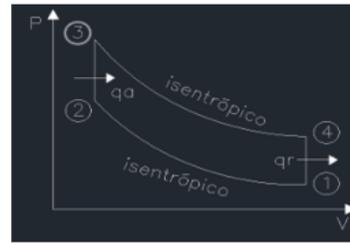
Entropía

Exergía

Método aproximado

Energía

Acerca de DT_Otto



Resultados:

Estado 1 (E1)

$p1$	100.0	[kPa]
$v1$	0.8839	[m ³ /kg]
$T1$	308.0	[K]
$s1$	3.92	[kJ/kg.K]
$u1$	345.96	[kJ/kg]
$\phi1$	2.23	[kJ/kg]

Estado 2 (E2)

$p2$	2292.78	[kPa]
$v2$	0.093	[m ³ /kg]
$T2$	737.0	[K]
$s2$	3.92	[kJ/kg.K]
$u2$	666.83	[kJ/kg]
$\phi2$	262.99	[kJ/kg]

Estado 3 (E3)

$p3$	6141.26	[kPa]
$v3$	0.093	[m ³ /kg]
$T3$	1969.0	[K]
$s3$	4.79	[kJ/kg.K]
$u3$	1774.2	[kJ/kg]
$\phi3$	1115.42	[kJ/kg]

Estado 4 (E4)

$p4$	313.25	[kPa]
$v4$	0.8839	[m ³ /kg]
$T4$	963.61	[K]
$s4$	4.79	[kJ/kg.K]
$u4$	854.36	[kJ/kg]
$\phi4$	255.69	[kJ/kg]

Resultados del ciclo en general

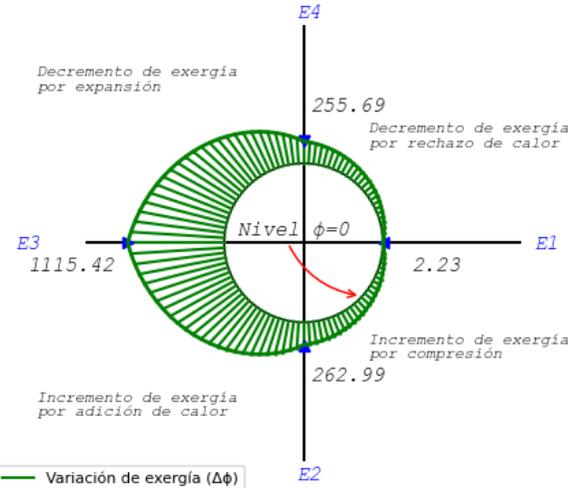
η	54.09	[%]	$\Delta u12$	320.86	[kJ/kg]
w_{neto}	598.98	[kJ/kg]	$\Delta u23$	1107.38	[kJ/kg]
q_a	1107.38	[kJ/kg]	$\Delta u34$	-919.84	[kJ/kg]
q_r	508.4	[kJ/kg]	$\Delta u41$	-508.4	[kJ/kg]
PME	757.38	[kPa]	$masa$	0.00068	[kg]

Método utilizado:

MÉTODO EXACTO



Gráfica de Exergía [kJ/kg]



ANEXO IV. Programa realizado para diagrama de energía por el método aproximado

Ciclo Otto

— □ ×

CICLO OTTO

Variables de entrada

r 9.5
 $T1$ 308 K
 $p1$ 100000 Pa **EJEMPLO**
 $v1$ 600 cm^3
 $T3$ 1969 K

RESET

Datos para cálculo de exergía

$Pamb$ 76000 Pa
 $Tamb$ 293 K

Métodos de resolución

Método exacto

Energía

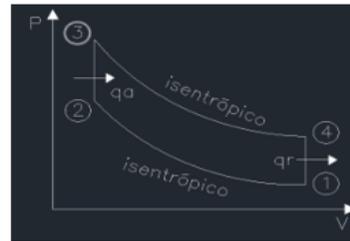
Entropía

Exergía

Método aproximado

Energía

Acerca de DT_Otto



Resultados:

Estado 1 (E1)

$p1$ 100.0 [kPa]
 $v1$ 0.884 [m^3/kg]
 $T1$ 308.0 [K]
 $s1$ [kJ/kg.K]
 $u1$ 221.14 [kJ/kg]
 $\phi1$ [kJ/kg]

Estado 2 (E2)

$p2$ 2337.83 [kPa]
 $v2$ 0.093 [m^3/kg]
 $T2$ 757.95 [K]
 $s2$ [kJ/kg.K]
 $u2$ 544.21 [kJ/kg]
 $\phi2$ [kJ/kg]

Estado 3 (E3)

$p3$ 6073.21 [kPa]
 $v3$ 0.093 [m^3/kg]
 $T3$ 1969.0 [K]
 $s3$ [kJ/kg.K]
 $u3$ 1413.74 [kJ/kg]
 $\phi3$ [kJ/kg]

Estado 4 (E4)

$p4$ 259.78 [kPa]
 $v4$ 0.884 [m^3/kg]
 $T4$ 800.12 [K]
 $s4$ [kJ/kg.K]
 $u4$ 574.49 [kJ/kg]
 $\phi4$ [kJ/kg]

Resultados del ciclo en general

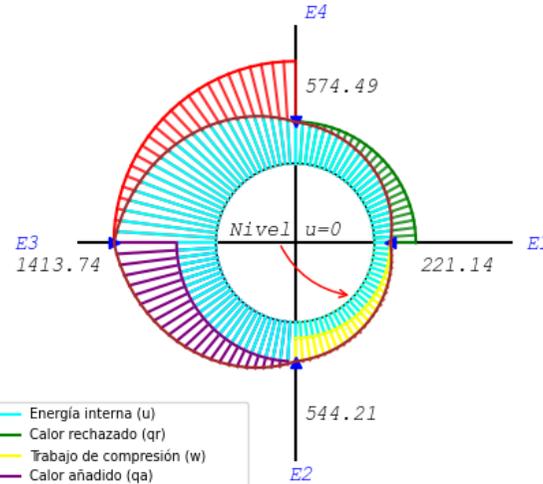
η 59.36 [%] $\Delta u12$ 323.06 [kJ/kg]
 w_{neto} 516.19 [kJ/kg] $\Delta u23$ 869.53 [kJ/kg]
 q_a 869.53 [kJ/kg] $\Delta u34$ -839.25 [kJ/kg]
 q_r 353.34 [kJ/kg] $\Delta u41$ -353.34 [kJ/kg]
 PME 652.65 [kPa] $masa$ 0.00068 [kg]

Método utilizado:

MÉTODO APROXIMADO



Gráfica de Energía [kJ/kg]



— Energía interna (u)
— Calor rechazado (qr)
— Trabajo de compresión (w)
— Calor añadido (qa)
— Trabajo de expansión (w)
— Variación de energía interna (u)

celeste + amarillo = Energía interna
 celeste + morado = Energía interna

ANEXO V. Manual de usuario

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MANUAL DE USUARIO DT-Otto

BRAYAN NICOLÁS NOLE SUÁREZ
brayan.nole@epn.edu.ec

DIRECTOR: MIGUEL DARÍO ORTEGA LÓPEZ
miguel.ortega@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2022

Manual de usuario

DT-Otto es un software que permite resolver los ciclos de potencia Otto mediante cálculos numéricos, considerando ciertas variables de entrada y a la mezcla aire-combustible como gas ideal y como fluido de trabajo, y, permite visualizar los diagramas termodinámicos de energía, entropía y exergía, todo esto con la utilización de Python y una interfaz gráfica sencilla para el usuario.

Cabe señalar que el software no requiere de instalación previa, debido a que el mismo está contenido en un ejecutable, el cual estará disponible para el usuario y al que solo debe darle clic para iniciar y empezar a trabajar de manera inmediata.

5.1 Pantalla principal

La pantalla principal del software desarrollada se muestra en la Figura 5.1, la misma que muestra dos divisiones, la división izquierda muestra los datos de entrada con sus respectivos botones para los métodos de solución considerados, mientras que la división derecha muestra los resultados tanto numéricos como gráficos.

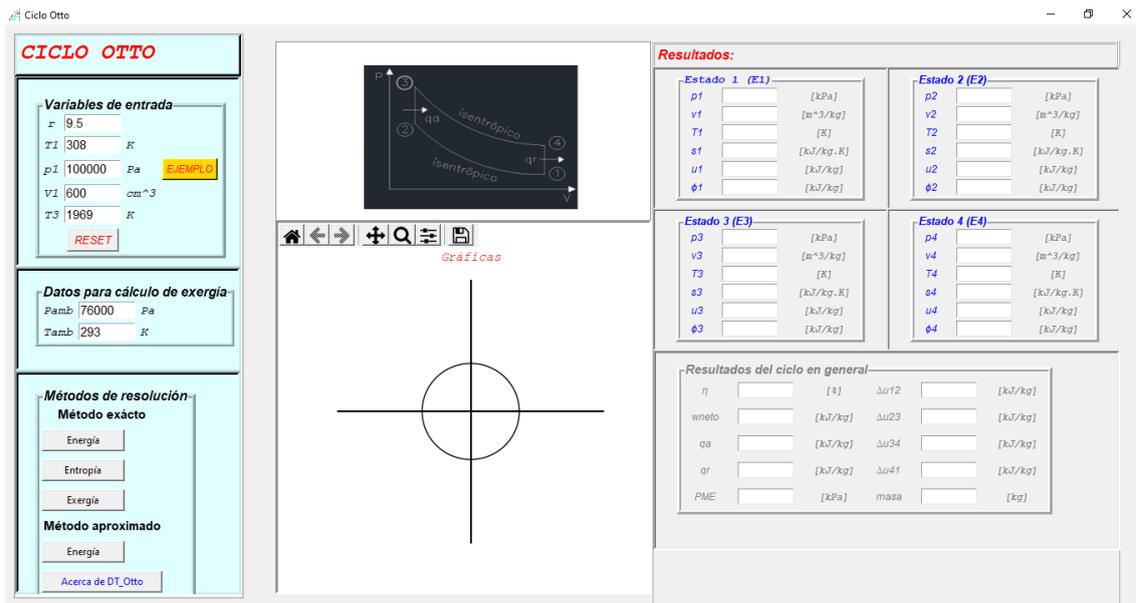


Figura 5.1 Pantalla principal del software

El programa trabaja con unidades del sistema internacional, a excepción del volumen, por temas de interpretación numérica. Como se muestra en la Figura 5.1, al iniciar el programa se encuentran seteados valores de ejemplo, de tal forma que el usuario tenga una base de valores reales para este ciclo. El botón ejemplo muestra otro ejercicio como referencia, considerando valores típicos o reales para este ciclo. En la parte superior de las gráficas a obtener se muestra el diagrama P-v, con el fin de poder visualizar el ciclo y la ubicación de los estados termodinámicos, mientras que, en la parte de resultados, se muestran las propiedades para cada estado termodinámico y el ciclo en general. Cabe señalar, que los resultados arrojados por el programa muestran las propiedades de cada estado

termodinámico, tales como: Presión (p), volumen específico (v), Temperatura (T), energía interna (u), entropía (s) y exergía (ϕ) para el método exacto. Para el método aproximado, se presenta las mismas propiedades exceptuando la entropía (s) y exergía (ϕ), mostrando líneas punteadas en estas propiedades. Además, se muestra los resultados generales del ciclo para ambos métodos, tales como: eficiencia (η), trabajo neto (w_{neto}), calor añadido (q_a), calor rechazado (q_r), presión media efectiva (PME), masa, y las variaciones de energía interna de estado a estado.

5.2 Variables de entrada

Las variables de entrada del programa para las gráficas de energía y entropía son las siguientes:

- ✓ Relación de compresión (r)
- ✓ Temperatura en el estado 1 (T_1) en kelvin (K)
- ✓ Presión en el estado 1 (p_1) en Pascales (Pa)
- ✓ Volumen del cilindro 1 (V_1) en centímetro cúbicos (cm^3)
- ✓ Temperatura en el estado 3 (T_3) en kelvin (K)

Además, para poder obtener la gráfica de exergía es necesario ingresar las siguientes variables de entrada:

- ✓ Presión atmosférica (P_{atm}) en Pascales (Pa)
- ✓ Temperatura ambiente (T_{amb}) en kelvin (K)

5.3 Consideraciones para la resolución del ciclo

Para la resolución satisfactoria de los cálculos numéricos y gráficos del ciclo es necesario cumplir con las siguientes consideraciones, en caso de no cumplir con las mismas, se mostrará un mensaje de error.

- $r > 1$
- $T_3 > T_1$
- $T_3 < 3000$
- $T_1, V_1, p_1, T_3, P_{\text{atm}}, T_{\text{amb}} > 0$

Todas estas consideraciones fueron realizadas con el fin de obtener un software que trabaje con valores reales para este ciclo.

5.4 Uso del software

Para el uso correcto del software es necesario tomar en cuenta todas las consideraciones realizadas, evitando así cualquier mensaje de error, por otro lado, es necesario que el usuario ingrese todas las variables de entrada para que se ejecute el programa sin problema alguno y estos valores deben numéricos.

Los pasos por seguir para el uso del programa son los siguientes:

- Se modifican los valores numéricos de una o todas las variables de entrada, tomando en cuenta las consideraciones anteriores.
- En caso de necesitar otro ejemplo, se presiona en el botón “EJEMPLO” y automáticamente se llenarán todas las casillas de los datos de las variables de entrada.
- Luego se presiona cualquiera de los botones de “Energía”, “Entropía” o “Exergía” para el método exacto e inmediatamente se mostrarán los resultados tanto numéricos como gráficos. Y en el caso del método aproximado, se presiona el botón “Energía” y automáticamente se mostrarán los resultados numéricos y gráficos.
- Una vez obtenido las gráficas, las mismas pueden ser guardadas mediante la barra de herramientas ubicada en la parte superior izquierda de la gráfica.
- Para poder visualizar como cambian las gráficas con la variación de alguna variable de entrada, tan solo se debe editar la misma y presionar nuevamente el botón correspondiente, no es necesario borrar todos los datos.
- Para poder ingresar un nuevo problema, se presiona el botón “RESET” y automáticamente se borrarán todos los datos de entrada ingresados y se procede a llenar cada uno de ellos con los nuevos valores.

Para poder visualizar el diagrama de energía, exergía o entropía (Figura 5.2) para su respectivo método de resolución, solo es necesario presionar en el mismo e inmediatamente se despliegan los resultados numéricos y gráficos.

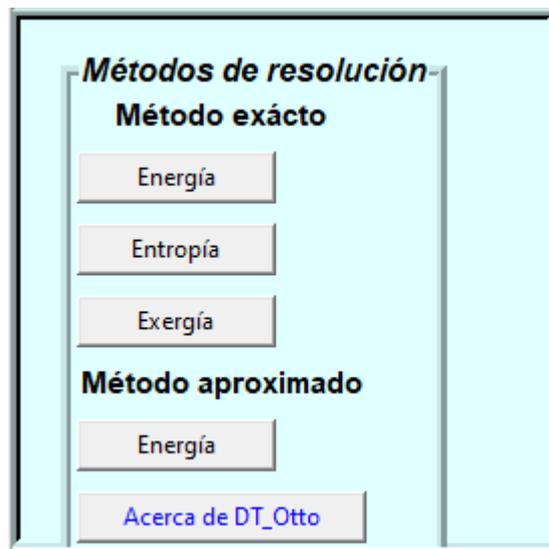


Figura 5.2 Botones para mostrar los diagramas correspondientes

Presionando en su respectivo botón, se muestra la siguiente interfaz:

Para el diagrama de energía por el método exacto:

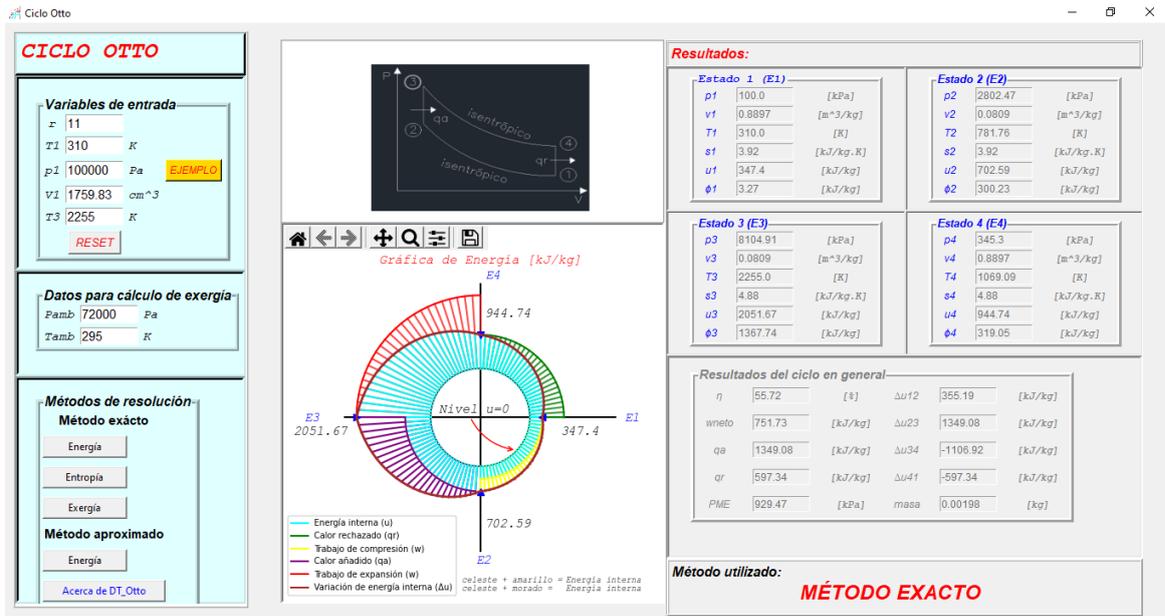


Figura 5.3 Interfaz mostrada para el diagrama de energía por el método exacto

Para el diagrama de entropía por el método exacto:

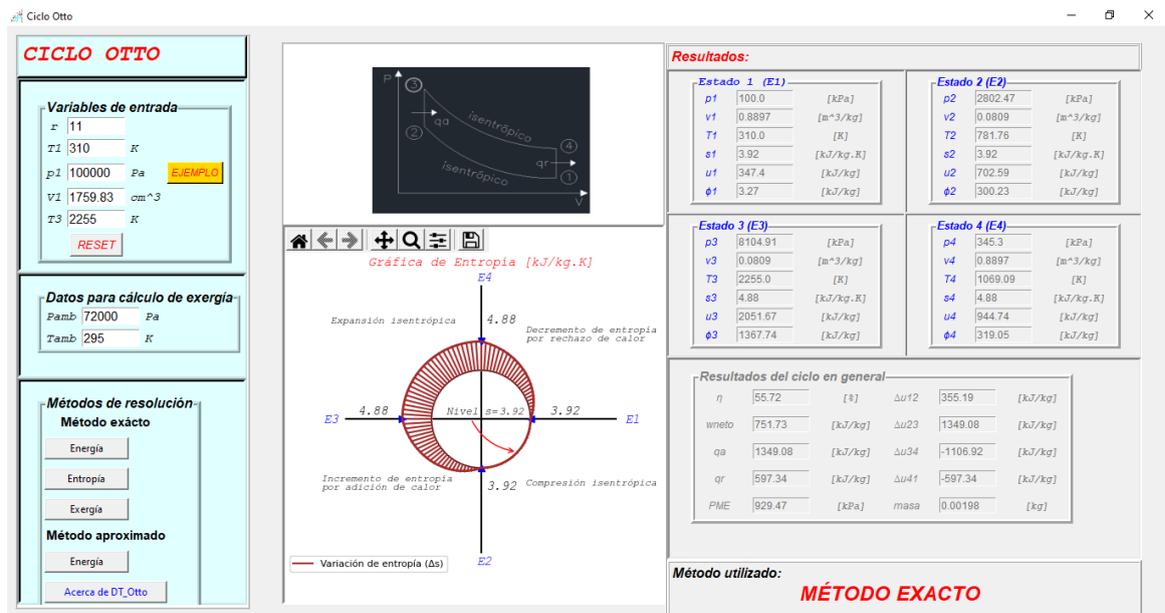


Figura 5.4 Interfaz mostrada para el diagrama de entropía por el método exacto

Para el diagrama de exergía por el método exacto:

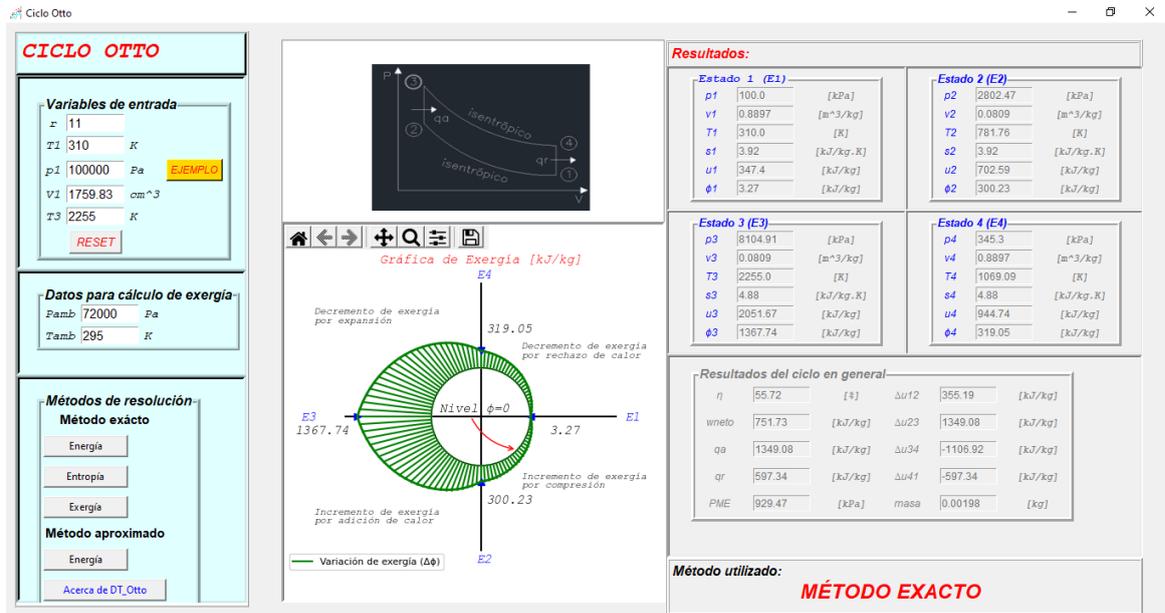


Figura 5.5 Interfaz mostrada para el diagrama de exergía por el método exacto

Para el diagrama de energía por el método aproximado:

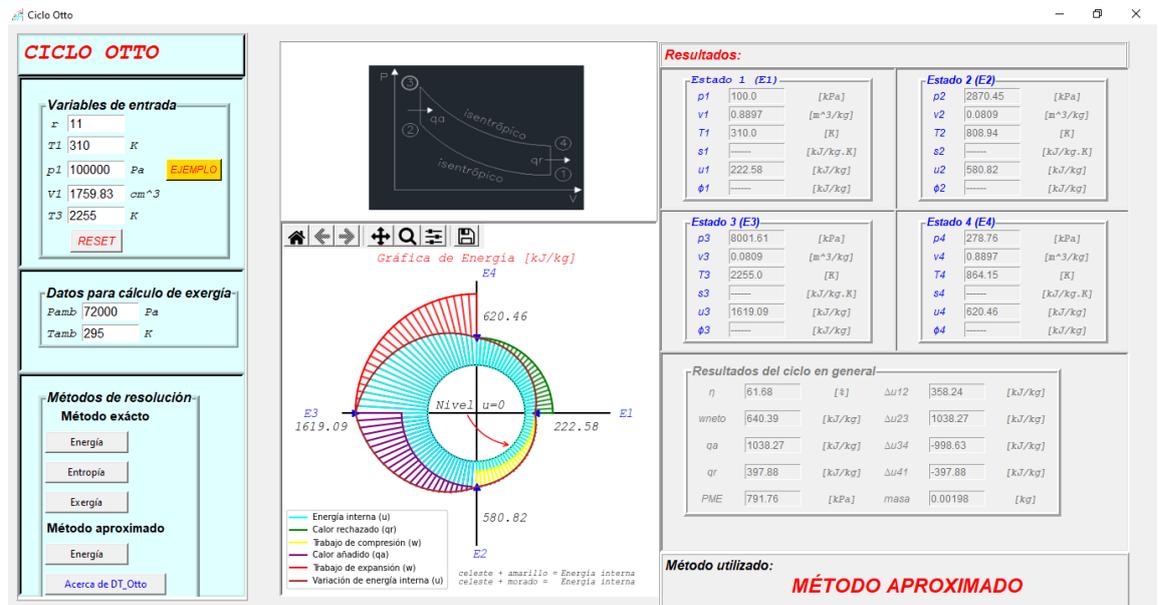


Figura 5.6 Interfaz mostrada para el diagrama de energía por el método aproximado

5.5 Botón “Acerca de DT-Otto”:

Al presionar sobre este botón, se despliega una nueva ventana con información relevante y general del software, en la Figura 5.7 se muestra la información proporcionada.



Figura 5.7 Información mostrada por el botón "Acerca de DT_Otto"