

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS INTERACTIVOS DE LOS
CICLOS DE POTENCIA ATKINSON Y BRAYTON CON
REGENERACIÓN**

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

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

DANIEL ALEJANDRO HERNÁNDEZ VILLARREAL

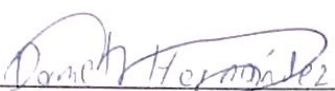
daniel.hernandez@epn.edu.ec

MIGUEL DARÍO ORTEGA LÓPEZ

miguel.ortega@epn.edu.ec

CERTIFICACIONES

Yo, Daniel Alejandro Hernández Villarreal 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.


Daniel Alejandro Hernández Villarreal

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Daniel Alejandro Hernández Villarreal, bajo mi supervisión.


Ing. Miguel Ortega López, MSc

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.

Daniel Alejandro Hernández Villarreal

Ing. Miguel Darío Ortega López, MSc.

DEDICATORIA

Quiero dar las gracias a todas aquellas personas que han estado para mí a lo largo de toda mi carrera universitaria, ya que sin ellas no hubiese sido posible estar en donde estoy. Un especial agradecimiento a mi madre Silvia Villarreal, a mi hermana Katherine Hernández, a mi tío Amilcar Villarreal, a mi primo Patricio Paredes, ya que ellos fueron los principales pilares para cumplir con mi meta académica, a mi compañero y especial amigo Wagner Márquez y también a mi profesor y tutor de tesis Miguel Ortega, que sin estas dos últimas personas hubiese sido difícil terminar este trabajo de titulación.

Daniel Alejandro Hernández Villarreal

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE ECUACIONES	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	2
Ciclo Atkinson	2
Método aproximado.....	4
Método exacto.....	6
Energía para un ciclo cerrado.....	7
Entropía para un ciclo cerrado.....	7
Exergía para un ciclo cerrado.....	8
Python.....	9
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Base teórica para el desarrollo de los diagramas interactivos de energía, entropía y exergía	11
2.2 Interpretación de los diagramas interactivos	13
Energía	13
Entropía	15
Exergía.....	15
2.3 Desarrollo del software en Python	16
Resolución numérica.....	16
Interfaz gráfica con Tkinter	21
Creación de los diagramas interactivos	23
Desarrollo del ejecutable.....	25
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
3.1 Resultados.....	26
Análisis de error	26
3.2 Análisis de sensibilidad.....	28
Análisis de sensibilidad al variar la relación de compresión (r)	29
Análisis de sensibilidad al variar la temperatura en estado 3 (T3)	34
3.3 Conclusiones	38
3.4 Recomendaciones.....	40
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
5 ANEXOS.....	42
ANEXO I. Software ciclo de potencia Atkinson. Diagrama interactivo de energía por el metodo exacto.	42
ANEXO II. Software ciclo de potencia Atkinson. Diagrama interactivo de entropía por el metodo exacto.	43
ANEXO III. Software ciclo de potencia Atkinson. Diagrama interactivo de exergía por el metodo exacto.	44
ANEXO IV. Software ciclo de potencia Atkinson. Diagrama interactivo de energía por el metodo aproximado.	45
Anexo V. Manual de Usuario	46

Ventana de inicio	47
Datos de entrada y condiciones ambientales.....	47
Botones auxiliares	48
Métodos de calculo.....	49
Método usado.....	50
Resultados en los 4 estados del ciclo	50
Resultados del ciclo.....	51
Diagrama T-s.....	52
Diagramas interactivos	53
Acerca del software	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Diagrama P-v y T-s del ciclo Atkinson.....	3
Figura 2. 1 Flujograma de la metodología.....	10
Figura 2. 2 Diagrama de resultados.....	12
Figura 2. 3 Diagrama interactivo correspondiente a la variación de Energía.....	14
Figura 2. 4 Diagrama interactivo correspondiente a la variación de entropía en el ciclo.	15
Figura 2. 5 Diagrama interactivo correspondiente a la variación de exergía en el ciclo.....	16
Figura 2. 6 Librería CoolProp.....	17
Figura 2. 7 Función PropSI.....	17
Figura 2. 8 Código para las variables de entrada.....	18
Figura 2. 9 Código solución numérica método exacto Parte 1.	19
Figura 2. 10 Código solución numérica método exacto Parte 2.	19
Figura 2. 11 Código solución numérica método aproximado Parte 1.	20
Figura 2. 12 Código solución numérica método aproximado Parte 2.	21
Figura 2. 13 Librería y funciones Tkinter.	21
Figura 2. 14 Raíz de la interfaz gráfica.	22
Figura 2. 15 Frams asignados para los gráficos.	22
Figura 2. 16 Label Frams para las diferentes secciones de la interfaz gráfica.	22
Figura 2. 17 Ejemplo de creación de los componentes de los diferentes Estados.	23
Figura 2. 18 Librería Matplotlib.	23
Figura 2. 19 Código para la creación de la gráfica base.	24
Figura 2. 20 Ejemplo: código para la ecuación de grafico de energía en el primer cuadrante.	24
Figura 2. 21 Función empaquetamiento de imagenes.	25
Figura 2. 22 Entorno auto-py-to-exe.	26
Figura 3. 1 Diagrama de energía, comparación relación de compresión.....	31
Figura 3. 2 Diagrama de entropía, comparación relación de compresión.....	32
Figura 3. 3 Diagrama de exergía, comparación relación de compresión.....	33
Figura 3. 4 Diagrama de energía, comparación temperatura en el estado 3.....	36
Figura 3. 5 Diagrama de entropía, comparación temperatura en el estado 3.....	37
Figura 3. 6 Diagrama de exergía, comparación temperatura en el estado 3.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Análisis de error para el método exacto.	27
Tabla 3. 2 Análisis de error para el método aproximado	28
Tabla 3. 3 Datos para el análisis de sensibilidad.	29
Tabla 3. 4 Tabla de análisis de resultados al variar la relación de compresión (método exacto).....	29
Tabla 3. 5 Tabla de análisis de resultados al variar la relación de compresión (método aproximado).....	30
Tabla 3. 6 Datos para el análisis de sensibilidad.	34
Tabla 3. 7 Tabla de análisis de resultados al variar la temperatura en el estado 3 (método exacto).....	34
Tabla 3. 8 a de análisis de resultados al variar la temperatura en el estado 3 (método aproximado).....	35

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. 1 Ecuación de los gases ideales	4
Ecuación 1. 2 Calores específico y constante de los gases para el aire como gas ideal.	4
Ecuación 1. 3 Relación de compresión	4
Ecuación 1. 4 Relación isentrópica 1	5
Ecuación 1. 5 Relación isentrópica 2	5
Ecuación 1. 6 Relación de expansión	5
Ecuación 1. 7 Energía interna con calor específico a volumen constante.	5
Ecuación 1. 8 Adición de calor a volumen constante.	6
Ecuación 1. 9 Rechazo de calor a presión constante.....	6
Ecuación 1. 10 Trabajo neto.	6
Ecuación 1. 11 Eficiencia del ciclo.	6
Ecuación 1. 12 Calor rechazado.	7
Ecuación 1. 13 Balance de energía en un sistema cerrado.	7
Ecuación 1. 14 Entropía en un sistema cerrado.....	8
Ecuación 1. 15 Entropía en un sistema adiabático.....	8
Ecuación 1. 16 Ecuación de la exergía para un sistema cerrado.....	8
Ecuación 2. 1 Ecuación linealizada para el primer cuadrante.	12
Ecuación 2. 2 Ecuación linealizada para el primer cuadrante.	13
Ecuación 2. 3 Ecuación linealizada para el primer cuadrante.	13
Ecuación 2. 4 Ecuación linealizada para el primer cuadrante.	13

RESUMEN

En el presente documento se realiza la explicación detallada del desarrollo de la herramienta informática correspondiente al ciclo de potencia Atkinson. Para su desarrollo es necesario analizar previamente información correspondiente al ciclo. El software se desarrolla a través del lenguaje de programación Python con ayuda de sus librerías, destacando la librería Tkinter con la cual se desarrolla la interfaz gráfica. Para su eficaz desarrollo se realiza una adecuada metodología en la que se describe todo el proceso de desarrollo. El software permite la entrada de 4 variables, necesarias para determinar el comportamiento termodinámico del ciclo en sus 4 estados y entrega como principales resultados 3 diagramas interactivos correspondientes a la energía, entropía y exergía del ciclo. Para saber si los resultados entregados por el software son correctos, se realiza la validación a través de un análisis de errores comparando los resultados obtenidos por el método analítico, el cual utiliza las tablas termodinámicas de Cengel, y también con ayuda del software TermoGraf. También se realizan 2 análisis de sensibilidad, en el primero se varía la relación de compresión y en el segundo la temperatura en el estado 3, de esta manera se analiza el comportamiento del ciclo y cómo cambian sus propiedades de estado a estado, cómo intervienen estas variables en el rendimiento térmico.

PALABRAS CLAVE: Ciclo de potencia Atkinson, Diagramas interactivos, Energía, Entropía, Exergía.

ABSTRACT

In the present document a detailed explanation of the development of the computer tool corresponding to the Atkinson power cycle is made. For its development it is necessary to previously analyze information corresponding to the cycle. The software is developed through the Python programming language with the help of its libraries, highlighting the Tkinter library with which the graphical interface is developed. For its efficient development, an adequate methodology is used to describe the whole development process. The software allows the input of 4 variables, necessary to determine the thermodynamic behavior of the cycle in its 4 states and delivers as main results 3 interactive diagrams corresponding to the energy, entropy, and exergy of the cycle. To know if the results delivered by the software are correct, the validation is performed through an error analysis comparing the results obtained by the analytical method, which uses the thermodynamic tables of Cengel, and with the help of the TermoGraf software. Two sensitivity analyses are also performed, in the first one the compression ratio is varied and in the second one the temperature in state 3, in this way the behavior of the cycle is analyzed and how its properties change from state to state, as these variables intervene in the thermal performance.

KEYWORDS: Atkinson power cycle, Interactive diagrams, Energy, Entropy, Exergy.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

A partir del semestre 2021B, se ha venido desarrollando una herramienta informática de soporte en el proceso de enseñanza aprendizaje de los ciclos termodinámicos, que está formada por un conjunto de módulos para la resolución y representación gráfica interactiva de cada ciclo. Al momento se dispone ya de los módulos Ciclo Rankine (DT-Rkn) y Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor (DT-Ref) con muy buenos resultados. Además de los módulos Ciclo Otto (DT-Otto) y Ciclo Diesel (DT-Diesel) que fueron presentados en el periodo 2022A.

Para el periodo 2022B, se desarrolla la herramienta informática correspondiente al ciclo de potencia Atkinson. Este ciclo posee sus particularidades y retos propios como la escasa información bibliográfica. Su funcionamiento es similar al Ciclo Otto, sin embargo, se plantea un reto, ya que su sistema funciona de diferente manera en la carrera de compresión concretamente en cuanto al cierre de la válvula de admisión, lo que hace que el ciclo Atkinson sea más eficiente termodinámicamente. Este ciclo se modela con aire gas ideal como sustancia de trabajo y las suposiciones típicas en el análisis termodinámico clásico. El módulo se desarrolla en la misma plataforma de los módulos previos, esto es en el lenguaje Python con sus respectivas librerías como Tkinter que ayuda al desarrollo de la interfaz gráfica. Se obtienen los tres diagramas interactivos buscados (energía, exergía y entropía). Una vez más, este módulo enriquece la aplicación informática de diagramas interactivos para ciclos termodinámicos fortaleciendo así el proceso de enseñanza-aprendizaje en termodinámica y su laboratorio.

1.1 Objetivo general

Desarrollar el módulo del ciclo de potencia Atkinson para la aplicación informática de diagramas interactivos.

1.2 Objetivos específicos

1. Recopilar información bibliográfica.
2. Desarrollar la programación básica del ciclo con proyección modular.
3. Replicar los conceptos de representación utilizados en módulos previos o generar un concepto generalizado apropiado nuevo para la representación de cada diagrama interactivo.

4. Integrar al desarrollo básico previo la programación de cada diagrama interactivo.
5. Obtener un archivo ejecutable o un instalador de la aplicación desarrollada.
6. Plasmar el desarrollo del software en el documento final incluyendo el manual de la aplicación desarrollada.

1.3 Alcance

Diseñar un programa ejecutable del ciclo Atkinson que permita obtener los diagramas de energía, exergía y entropía. Para ello se utilizará el lenguaje Python con la librería CoolProp para el desarrollo del diagrama interactivo con la sustancia de estudio “aire gas ideal”. Se desarrollará la solución numérica utilizando el método exacto y el método aproximado. Se comprobará los resultados con cálculos manuales y otro software como TermoGbraf para evidenciar la congruencia de los resultados obtenidos. El análisis de resultados se orientará a evaluar el desempeño del software desarrollado y a explorar la sensibilidad sobre alguna variable representativa.

Adicionalmente a lo planificado en el semestre previo, se desarrolla también el diagrama temperatura entropía (T-s) para el ciclo.

1.4 Marco teórico

Ciclo Atkinson

El ciclo Atkinson es similar al ciclo Otto en el proceso de compresión y en la adición de calor, pero diferente en el proceso de expansión adiabática porque es más prolongada con el objetivo de alcanzar la presión atmosférica[1]. Cabe recalcar que en el ciclo Otto el proceso de expansión produce alta presión, mayor a la presión atmosférica. El resultado de prolongar la expansión adiabática es lograr una mayor eficiencia [1].

En El ciclo Otto, la válvula se encuentra cerrada al realizar toda la carrera de compresión, pero en el ciclo Atkinson este proceso difiere en ello, ya que la válvula de admisión permanece abierta un ligero tiempo [2]. Al estar la válvula abierta el combustible regresa, produciendo menores pérdidas en la carrera de compresión.

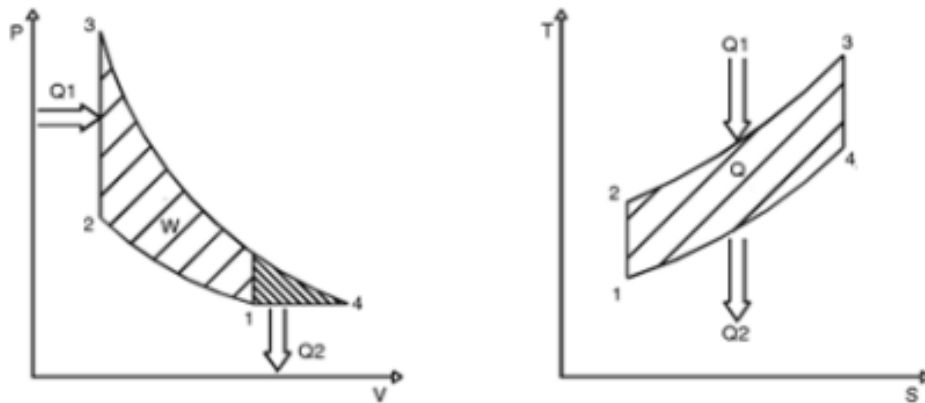


Figura 1. 1 Diagrama P-v y T-s del ciclo Atkinson.

1-2 Proceso de compresión adiabática

2-3 Proceso de adición de calor (isocórico)

3-4 Proceso de expansión adiabática

4-1 Proceso de rechazo de calor a presión constante (isobárico)

En el proceso de 1-2 se presenta un trabajo de compresión y es un proceso adiabático porque además de ser un proceso isentrópico, también es un proceso reversible.

En el proceso de 2-3 se presenta una adición de calor y es isocórico porque sus volúmenes son constantes.

En el proceso de 3-4 se presenta un trabajo de expansión y también es proceso adiabático.

En el proceso de 4-1 se presenta una salida de calor y es un proceso isobárico porque sus presiones se mantienen constantes, en este proceso también se tiene un trabajo de compresión.

Es importante mencionar en este apartado, la importancia de la relación de compresión en el ciclo de potencia Atkinson. Al aumentar la relación de compresión, el pistón comprime mucho más la mezcla del combustible, es por esta razón que se produce un mayor trabajo de expansión. Al aumentar la relación de compresión, se obtiene una mayor eficiencia porque se aprovecha de mejor manera a la energía, el calor rechazado es menor. [1].

La relación de compresión mientras más grande sea, mejores efectos se tendrán, es por esta razón que su valor no debe ser menor a 8. [3]

Método aproximado

El método aproximado trata de simplificar el proceso de análisis isentrópico tomando en cuenta a los calores específicos como constantes. En el caso de los gases ideales, se tiene que los calores específicos por lo general suelen ser lineales, es por este motivo que el error de los resultados no suele ser muy grande si las temperaturas no son muy distantes [4]. Para este método se utiliza la ecuación de los gases ideales **Ecuación 1.1**.

$$PV=mRT$$

Ecuación 1. 1 Ecuación de los gases ideales

A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para el ciclo de potencia Atkinson. A diferencia del ciclo Otto, si se tiene un estado en el que se presenta presión constante, por tanto, para este caso se utilizan los valores de **Cv** y **Cp** del aire como gas ideal que es el fluido que se utiliza para este ciclo, así como el valor **R** que es la constante de los gases ideales correspondiente al aire.

$$Cv = 0.7180, Cp = 1.0052, k = 1.4, R = 0.287 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

Ecuación 1. 2 Calores específico y constante de los gases para el aire como gas ideal.

Como se ha mencionado anteriormente, la información correspondiente al ciclo de potencia Atkinson resulta ser muy escasa, las ecuaciones mostradas a continuación se las ha tomado de la recopilación de varias citas bibliográficas.

La relación de compresión como su mismo nombre lo dice, relaciona los volúmenes en los diferentes estados del ciclo como se muestra en la **Ecuación 1.3**.

$$r = \frac{v1}{v2} = \frac{v4}{v3} = \frac{V1}{V2} = \frac{V4}{V3}$$

Ecuación 1. 3 Relación de compresión

r: Relación de compresión

v1, v2: Volumen específico en los estados 1 y 2

v3, v4: Volumen específico en los estados 3 y 4

V1, V2: Volumen en los estados 1 y 2

V3, V4: Volumen en los estados 3 y 4

Para relacionar los diferentes estados, se utilizan los dos procesos isentrópicos: compresión para los estados de 1 a 2 y expansión para los estados de 3 a 4 que se dan en el ciclo, en la **Ecuaciones 1.4** y en la **Ecuación 1.5** se muestran las relaciones isentrópicas.

$$\frac{T_2}{T_1} = r^{k-1}$$

Ecuación 1. 4 Relación isentrópica 1

$$\frac{P_2}{P_1} = r^k$$

Ecuación 1. 5 Relación isentrópica 2

T1, T2: Temperaturas 1 y 2.

P1, P2: Presiones 1 y 2.

k: Relación de calores específicos Cp/Cv.

En la expansión isentrópica al igual que en el proceso de compresión isentrópico, se tiene una relación, en este caso llamada relación de expansión, necesaria para realizar los cálculos del ciclo.

$$re = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1}{k}}$$

Ecuación 1. 6 Relación de expansión

re: Relación de expansión.

P3, P4: presiones en el estado 3 y 4.

Para la energía interna se usa la siguiente fórmula considerando el calor específico a volumen constante.

$$u = C_v * T$$

Ecuación 1. 7 Energía interna con calor específico a volumen constante.

u: Energía interna en cualquier estado.

Cv: Calor específico a volumen constante.

T: Temperatura en cualquier estado.

Rechazo y adición de calor en los estados de 4 a 1 y de 2 a 3 respectivamente, se tiene la

siguiente ecuación.

$$q_a = C_v(T3 - T2)$$

Ecuación 1. 8 Adición de calor a volumen constante.

$$q_r = C_p(T4 - T1)$$

Ecuación 1. 9 Rechazo de calor a presión constante.

qa: Calor añadido.

qr: Calor rechazado

Cp: Calor específico a presión constante.

Trabajo neto:

$$W_{ne} = q_a - q_r$$

Ecuación 1. 10 Trabajo neto.

Eficiencia está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta = \left(1 - \frac{q_r}{q_a}\right) * 100$$

Ecuación 1. 11 Eficiencia del ciclo.

Método exacto

A diferencia del método aproximado, el método exacto no utiliza la suposición de calores específicos, esto sucede en casos en los que el cambio de temperaturas es muy grande y sus calores específicos no varían linealmente, en este caso se deben usar relaciones exactas [4].

Para el cálculo de los valores como la entropía, energía interna, densidad, temperatura y presión en cada estado del ciclo, se utilizan valores tabulados que se encuentran en las tablas de Cengel. Cabe mencionar que los valores que se obtienen en Coolprop (librería Python para determinar propiedades termodinámicas) y por medio de las tablas de Cengel son diferentes, esto se debe a que el punto de referencia de algunas propiedades es arbitrario y difieren entre autores.

En el método exacto también se utiliza la relación de compresión expresada en la **Ecuación 1.3**.

Para el trabajo neto, eficiencia y calor añadido se tienen las mismas ecuaciones mostradas para el método exacto, correspondiente a las **Ecuación 1.11, Ecuación 1.10 y Ecuación 1.8**.

El calor rechazado en el ciclo Atkinson difiere del ciclo Otto porque se trata de un proceso a presión constante.

$$q_r = u_4 - u_1 + P_4 * v_4 - P_1 * v_1$$

Ecuación 1. 12 Calor rechazado.

Energía para un ciclo cerrado

La energía es el cambio total que ocurre en un sistema de proceso a proceso, en el caso del ciclo Atkinson son 4 procesos, la variación de energía sin importar si aumenta o disminuye si vuelve cero en un sistema cerrado porque la energía en su proceso inicial es igual a la energía en el proceso final, a esto se le conoce como balance de energía. [4]

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

Ecuación 1. 13 Balance de energía en un sistema cerrado.

ΔE : Representa la variación de energía.

E_1 : Representa la energía que entra al sistema.

E_2 : Representa la energía que sale del sistema.

Entropía para un ciclo cerrado

Primero es necesario aclarar que, al tratarse de un sistema cerrado, no se tiene un flujo de masa, entonces es de esperarse que el balance de entropía sea la diferencia entre la entropía inicial y la final. La entropía en si se refiere al desorden que existe en un sistema, es decir que describe lo irreversible. La entropía aparece por la transferencia de calor en las fronteras del sistema. [4]

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

Ecuación 1. 14 Entropía en un sistema cerrado.

Al tratarse de procesos adiabáticos, que en el caso del ciclo Atkinson existen 2, se tiene que el calor $Q = 0$, por lo que la ecuación se reduce a:

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

Ecuación 1. 15 Entropía en un sistema adiabático.

Q_k : Transferencia de calor en la frontera.

T_k : Temperatura en la frontera.

S_{gen} : Entropía generada.

$\Delta S_{sistema}$: Variación de entropía en el sistema.

S_2 : Entropía final.

S_1 : Entropía inicial.

Exergía para un ciclo cerrado

La exergía también llamada disponibilidad, es la medida que ayuda a determinar el potencial de trabajo útil producido por un sistema [4]. El Trabajo útil, solo tendría lugar cuando la entropía del sistema no aumente, es decir cuando el sistema sea cerrado. [5] La exergía depende de los parámetros ambientales, es decir, de la presión y temperatura ambiente, para un sistema cerrado se tiene la siguiente ecuación de exergía.

$$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$$

Ecuación 1. 16 Ecuación de la exergía para un sistema cerrado.

ϕ : Exergía.

u : Energía interna en un estado determinado.

u_0 : Energía interna a condiciones ambientales.

P_0 : Presión a temperatura ambiente.

v : Volumen específico en un estado determinado.

v_0 : Volumen específico a condiciones ambientales.

T_0 : Temperatura ambiente.

s : Entropía en un estado determinado.

s_0 : Entropía a temperatura ambiente.

Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel y que puede ser implementado en varias plataformas, sistemas operativos, etc. Su uso es resulta ser muy interactivo para el usuario y cuenta con varios módulos útiles para todas las aplicaciones posibles. Los archivos tienen la extensión py. [6] Python cuenta con una gran variedad de librerías orientadas a diferentes funciones, como por ejemplo Tkinter que sirve para el desarrollo de interfaces graficas.

2 METODOLOGÍA

En el siguiente flujograma **Figura 2.1** se describe el proceso que se utiliza para el desarrollo del software modular. Se describe el proceso a utilizar para el desarrollo del componente.

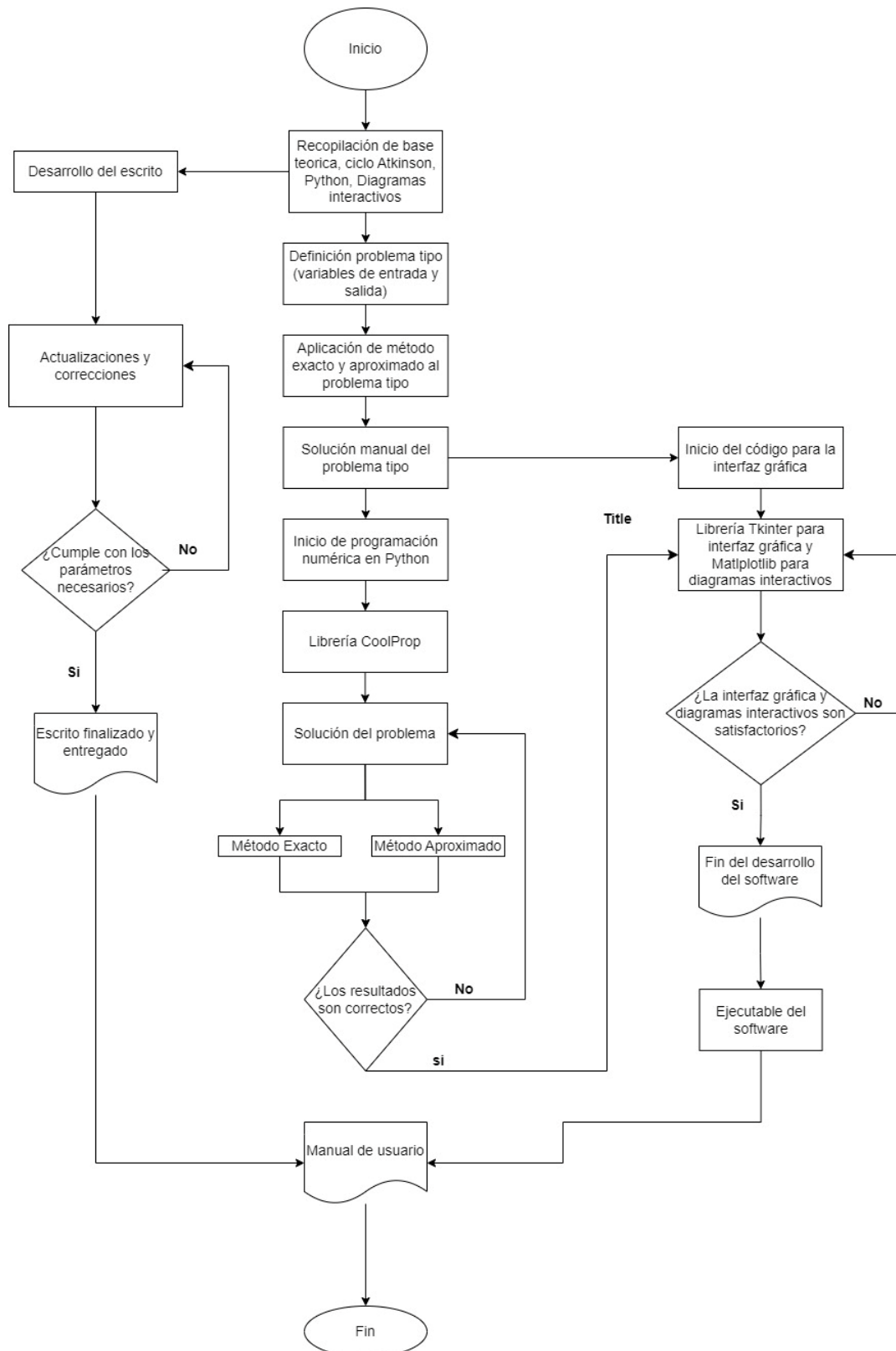


Figura 2. 1 Flujograma de la metodología.

En primera instancia para su desarrollo se recopila información que ya se ha mostrado con anterioridad, es decir una base teórica necesaria en la que se explica los fundamentos de dicho ciclo: propiedades, estado de compresión, estado de expansión, entrada y salida de calor, etc., necesarios para determinar la variación de energía, entropía y exergía del ciclo. En este apartado también se describe el proceso

Con la información recopilada respecto al ciclo, se realiza un ejemplo modelo de manera manual tanto por el método exacto como aproximado. Para el método exacto se utilizan las tablas termodinámicas de Cengel, mientras que para el método aproximado se utilizan las ecuaciones de gas ideal.

La resolución manual y sus resultados sirven como guía para saber el correcto orden para relacionar las ecuaciones en cada estado y plasmarlas adecuadamente en Python. Como se menciona anteriormente, para el método exacto el valor de las variables termodinámicas correspondientes al ciclo como: entropía, energía interna, temperaturas, presión, densidades, son diferentes porque análogamente como estos valores se obtienen de las tablas de Cengel para la solución manual, en Python las mismas se obtienen de la librería CoolProp, y estas tienen el punto de referencia diferente, pero los resultados como la eficiencia, trabajo, calor añadido, calor rechazado, son iguales. Para el método aproximado a diferencia del método exacto, todos los valores obtenidos en Python son iguales a los obtenidos manualmente.

Después de realizado el ejercicio manual y teniendo en cuenta sus diferencias con los resultados a obtenerse en Python, se empieza con el diseño de la interfaz gráfica para el software. La principal base para este diseño es la librería Tkinter de Python ya que a partir de ella se diseñan las ventanas principales Widgets, Labels, Botones, etc.

Al tener una estructura de interfaz gráfica satisfactoria, se crea el espacio para los diagramas interactivos de energía, entropía y exergía. Para el desarrollo de dichos diagramas se recurre principalmente a la librería Matplotlib, útil para la generación de gráficos en 2D.

Por último, se crea el ejecutable del software y el manual de usuario.

2.1 Base teórica para el desarrollo de los diagramas interactivos de energía, entropía y exergía

Los diagramas establecidos para la interpretación de la energía, entropía y exergía no son obtenidos de alguna bibliografía conocida, estos modelos de diagramas son diseñados por

el director de tesis Ing. Miguel Ortega y los estudiantes que realizaron los anteriores módulos de DT-Diesel y DT-Otto [7], [8], para el caso del ciclo Atkinson se usará el mismo modelo de gráficos.

Como se muestra en la **Figura 1.1**, el grafico base cuenta con dos líneas perpendiculares que forman un plano cartesiano, en su centro se encuentra una circunferencia de 360°, en cada eje se establece cada estado del ciclo en sentido horario.

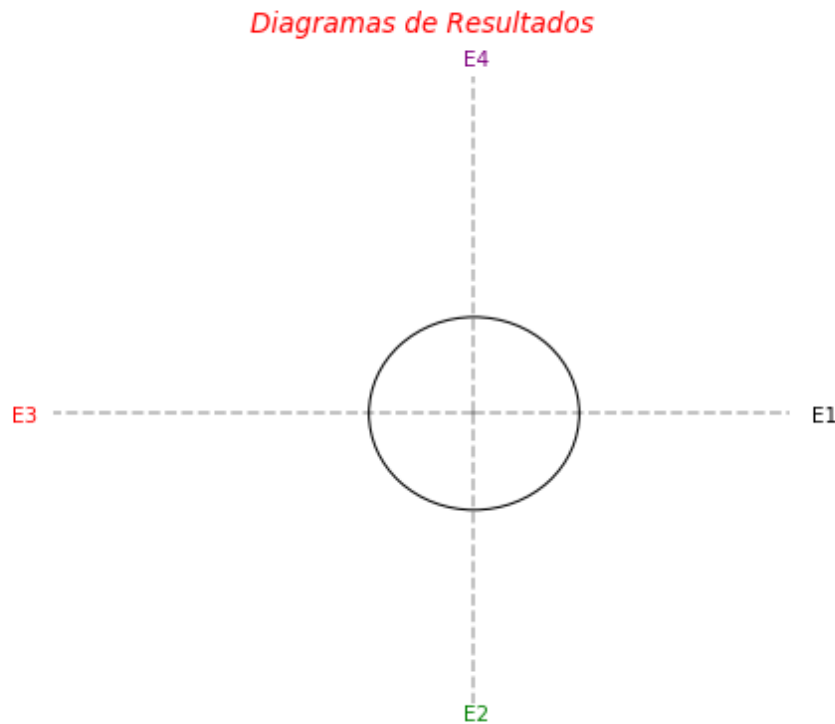


Figura 2. 2 Diagrama de resultados.

La representación de la variación de los resultados obtenidos de estado a estado, ya sea de la energía, entropía o exergía se los representa a través de líneas que rodean el círculo base variando su tamaño según corresponda. Para obtener estas líneas se realiza la linealización correspondiente a cada cuadrante en función de un ángulo que lo llamaremos Alpha, como se muestra a continuación.

Para el primer cuadrante que tiene los estados de E1-E4, corresponde a un ángulo que varía desde 0° a 90°, la linealización para este cuadrante esta dado por la **Ecuación 2.1**

$$X_n = \left(X_{E1} + (X_{E4} - X_{E1}) * \left(\frac{Alpha}{90^\circ} \right) \right)$$

Ecuación 2. 1 Ecuación linealizada para el primer cuadrante.

Para el segundo cuadrante que tiene los estados de E4-E3, corresponde un ángulo que varía desde 90° a 180°, la linealización para este cuadrante esta dado por la **Ecuación 2.2**

$$X_n = \left(X_{E4} + (X_{E3} - X_{E4}) * \left(\frac{Alpha - 90^\circ}{90^\circ} \right) \right)$$

Ecuación 2. 2 Ecuación linealizada para el segundo cuadrante.

Para el tercer cuadrante que tiene los estados de E3-E2, corresponde un ángulo que varía de 180° a 270°, la linealización para este cuadrante esta dado por la **Ecuación 2.3**

$$X_n = \left(X_{E4} + (X_{E3} - X_{E4}) * \left(\frac{Alpha - 180^\circ}{90^\circ} \right) \right)$$

Ecuación 2. 3 Ecuación linealizada para el tercer cuadrante.

Para el cuarto cuadrante que tiene los estados de E2-E1, corresponde un ángulo que varía de 270° a 360°, la linealización para este cuadrante esta dado por la **Ecuación 2.4**

$$X_n = \left(X_{E4} + (X_{E3} - X_{E4}) * \left(\frac{Alpha - 270^\circ}{90^\circ} \right) \right)$$

Ecuación 2. 4 Ecuación linealizada para el cuarto cuadrante.

x_n : Valor cuantitativo de la propiedad (energía, entropía o exergía) que se presenta en cualquier punto de los 4 cuadrantes.

Es importante mencionar que estas ecuaciones se las introduce en un ciclo For, por lo que se necesita un cierto número de repeticiones dentro de un rango, el rango del valor n se encuentra entre $1 \leq n \leq 100$.

2.2 Interpretación de los diagramas interactivos

Energía

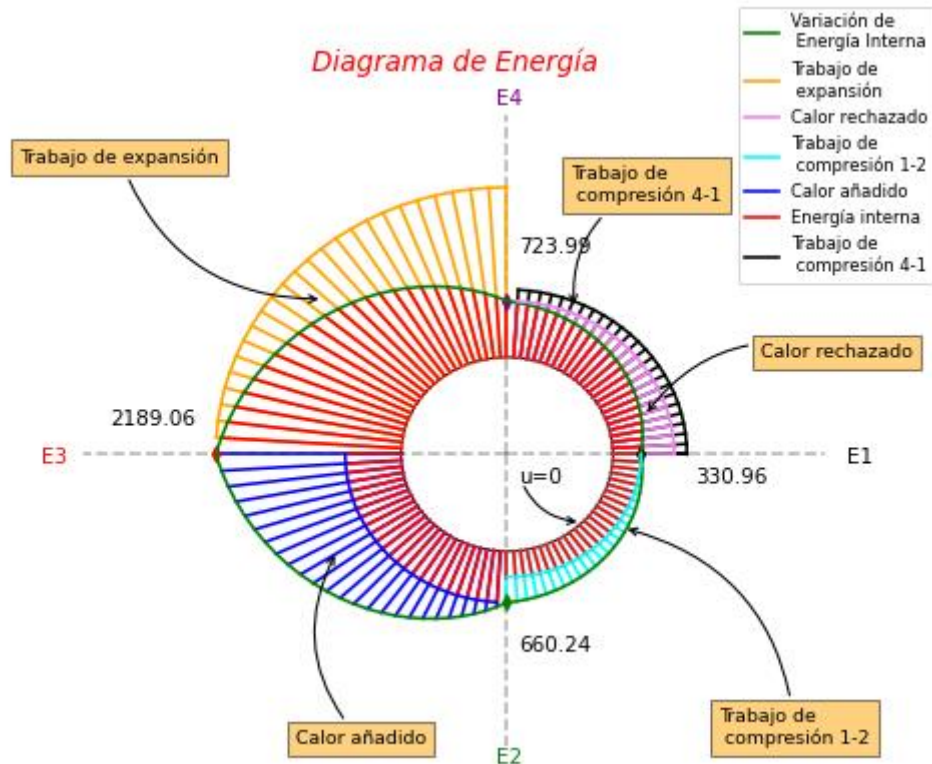


Figura 2. 3 Diagrama interactivo correspondiente a la variación de Energía.

En la **Figura 2.3** se muestra el resultado final del diagrama interactivo correspondiente a la variación de energía en el ciclo, a continuación, se explica que representa cada color en los diferentes cuadrantes. En las líneas de ejes, se encuentra el valor de la energía interna correspondiente a cada estado del ciclo, en los cuadros amarillos se enuncia el tipo de energía que participa en cada cuadrante.

- Las líneas de color rojo que se encuentran en los 4 estados representan la variación de la energía interna de todo el ciclo.
- En el primer cuadrante entre los estados 1 y 4 se representa al calor de rechazo menos el trabajo del proceso 4-1 con un color violeta.
- En el segundo cuadrante entre los estados 3 y 4 se representa al trabajo de expansión con un color naranja.
- En el tercer cuadrante entre los estados 2 y 3 se representa la adición de calor con un color azul.
- Por último, el cuarto cuadrante entre los estados 1 y 2 se representa el trabajo de

compresión con un color celeste

Entropía

En la **Figura 2.4** se muestra el resultado final del diagrama interactivo correspondiente a la entropía, al igual que en el diagrama de energía, en los cuadros amarillos se indica la razón del incremento y decremento de entropía en el ciclo, en los ejes se muestra el valor de entropía en cada estado.

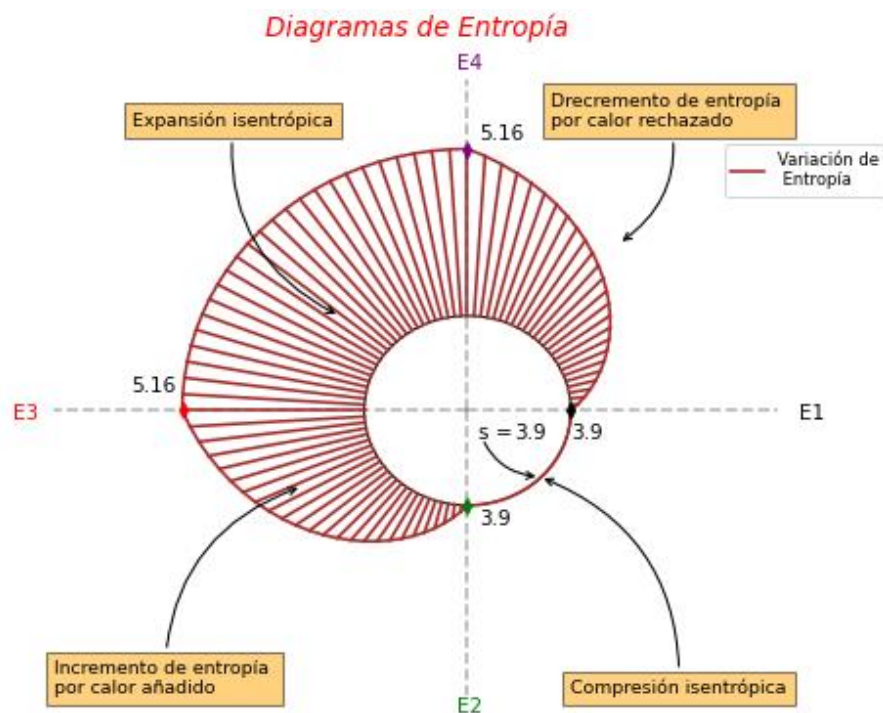


Figura 2. 4 Diagrama interactivo correspondiente a la variación de entropía en el ciclo.

Exergía

En la **Figura 2.5** se muestra el resultado final del diagrama interactivo correspondiente a la exergía, al igual que en los diagramas mencionados anteriormente, en los cuadros amarillos se indica la razón del incremento y decremento de exergía en el ciclo, en los ejes se muestra el valor de exergía en cada estado.

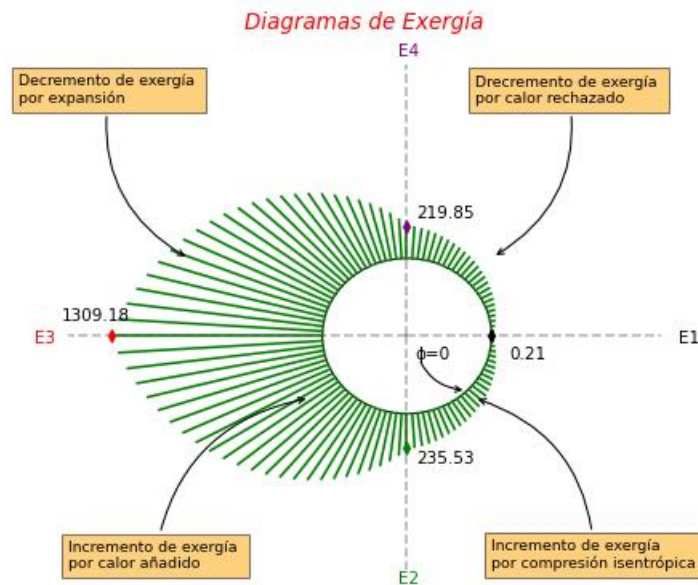


Figura 2. 5 Diagrama interactivo correspondiente a la variación de exergía en el ciclo.

2.3 Desarrollo del software en Phyton

Resolución numérica

Para empezar a desarrollar el código numérico en Python, se definen las variables que el usuario debe ingresar para el posterior cálculo del resto de incógnitas termodinámicas en los diferentes estados, las variables de ingreso seleccionadas son 6 de ellas y con ayuda de procesos termodinámicos se determinan el valor del resto de incógnitas:

- **T1:** Temperatura en el estado 1 [K]
- **T3:** Temperatura en el estado 3 [K]
- **P1:** Presión en estado 1 [Pa]
- **Pa:** Presión ambiente [Pa]
- **Ta:** Temperatura ambiente [K]
- **r:** Relación de compresión

Las condiciones ambientales intervienen explícitamente en el cálculo de la exergía y no intervienen en el cálculo de las otras variables.

Método exacto

Para el método exacto se utiliza la librería CoolProp, a partir de ella y con los datos de entrada, se determina el valor de las otras variables. Primero hay que llamar a la librería como se

muestra en la **Figura 2.6**.

```
import CoolProp.CoolProp as CP
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
```

Figura 2. 6 Librería CoolProp.

PropsSI es la función que permite determinar el valor de otras variables a partir de dos datos, que en este caso son los datos de entrada.

```
D1e = CP.PropsSI('D', 'T', tT1e, 'P', tP1e, 'Air')
S1e = CP.PropsSI('S', 'T', tT1e, 'P', tP1e, 'Air')
```

Figura 2. 7 Función PropsSI.

De la **Figura 2.7**, primero se da nombre a una variable para luego llamar a la función PropsSI, la primera letra dentro del paréntesis determina la propiedad termodinámica que se desea obtener, la segunda y cuarta letra representan las propiedades termodinámicas que se tienen de datos, en el tercer y quinto espacio, se coloca el valor numérico de dichos datos y, por último, se coloca el nombre de la sustancia, en este caso el Aire como gas ideal.

A continuación, en las figuras se muestra el código desarrollado para el método exacto, como se menciona antes para este método se utiliza la librería CoolProp y su función PropsSI. Se realizan las consideraciones para CoolProp, la más importante es la consideración de unidades, se mencionan las unidades para las variables de entrada y algunas variables de salida usadas en el cálculo de este método:

- Temperatura: se ingresa el valor en grados Kelvin [K].
- Presión: se ingresa el valor en Pascales [Pa].
- Densidad: entrega el valor en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- Entropía: entrega el valor en $\left[\frac{J}{kg.K}\right]$
- Energía interna: entrega el valor en $\left[\frac{J}{kg}\right]$

```

rc=float(r.get()) #Relación de compresión
tr.configure(state='normal')
tr.delete(0,'end')
tr.insert(0,rc)

ttple=float(pl.get()) #Presion1
tplee=tple/1000
tple.configure(state='normal')
tple.delete(0,'end')
tple.insert(0,round(tplee,2))
tple.configure(state='disabled')

tT1e=float(T1.get()) #Temperatural
t1e.configure(state='normal')
t1e.delete(0,'end')
t1e.insert(0,round(tT1e,2))
t1e.configure(state='disabled')

tT3e=float(T3.get()) #Temperatura3
tt3e.configure(state='normal')
tt3e.delete(0,'end')
tt3e.insert(0,round(tT3e,2))
tt3e.configure(state='disabled')

pae=float(pa.get()) #Presion ambiente
tpae.configure(state='normal')
tpae.delete(0,'end')
tpae.insert(0,round(pae,0))

tae=float(ta.get()) #Temperatura ambiente
ttae.configure(state='normal')
ttae.delete(0,'end')
ttae.insert(0,round(tae,0))

```

Figura 2. 8 Código para las variables de entrada.

En la **Figura 2.8** se definen las 6 variables que deben ser ingresadas por el usuario, float es una función que transforma el valor de una variable en número flotante, es decir en valores decimales, dentro de ella se asigna un valor get que sirve para devolver un valor especificado.

```

#Proceso 1-2
D1e = CP.PropsSI('D','T',tT1e,'P',ttp1e,'Air') #Densidad1
S1e = CP.PropsSI('S','T',tT1e,'P',ttp1e,'Air') #Entropia1
ule = CP.PropsSI('U','T',tT1e,'P',ttp1e,'Air') #Energía interna1
v1e = float(1/D1e) #Volumen especifico1
φ1e = (ule-u_0)+pae*(v1e-v_0)-tae*(S1e-s_0) #Exergía1

#Proceso 2-3
S2e=S1e #Entropia2
v2e=v1e/rc #Volumen especifico2
D2e=(D1e)*(rc) #Densidad2
tT2e = CP.PropsSI('T','S',S2e,'D',D2e,'Air') #Temperatura2
ttp2e = CP.PropsSI("P","S",S2e,"D",D2e,'Air') #Presión2
u2e = CP.PropsSI('U','T',tT2e,'P',ttp2e,'Air') #Energía interna2
v3e=v2e #Volumen especifico3
D3e=D2e #Desnsidad3
φ2e = (u2e-u_0)+pae*(v2e-v_0)-tae*(S2e-s_0) #Exergía2

#Proceso 3-4
S3e = CP.PropsSI('S','T',tT3e,'D',D3e,'Air') #Entropia3
u3e = CP.PropsSI('U','T',tT3e,'D',D3e,'Air') #Energía interna3
ttp3e = CP.PropsSI('P','S',S3e,'D',D3e,'Air') #Presión3
φ3e = (u3e-u_0)+pae*(v3e-v_0)-tae*(S3e-s_0) #Exergía3

#Proceso 4-1
S4e=S3e #Entropía4
ttp4e=ttp1e #Presión4
D4e = CP.PropsSI('D','P',ttp4e,'S',S4e,'Air')
tT4e = CP.PropsSI('T','S',S4e,'D',D4e,'Air') #Temperatura4
u4e = CP.PropsSI('U','D',D4e,'S',S4e,'Air') #Energía interna4
v4e=1/D4e #Volumen especifico4
φ4e = (u4e-u_0)+pae*(v4e-v_0)-tae*(S4e-s_0) #Exergía4

```

Figura 2. 9 Código solución numérica método exacto Parte 1.

```

#Delta de energía interna 1-2
Δu12e=u2e-ule

#Delta de energía interna 2-3
Δu23e=u3e-u2e

#Delta de energía interna 3-4
Δu34e=u4e-u3e

#Delta de energía interna 4-1
Δu41e=ule-u4e

#Calor de añadido
qae=u3e-u2e

#Calor rechazado
qre=u4e-ule+tp4ee*v4e-tp1ee*v1e

#Trabajo neto
wneto=qae-qre

#Eficiencia
ηe=(1-(qre/qae))*100

```

Figura 2. 10 Código solución numérica método exacto Parte 2.

En las **Figura 2.9** y **Figura 2.10** se explica la codificación utilizada para la solución del problema por el método exacto, en el proceso de 1 a 2 se utiliza la función PropSI y las condiciones del ciclo Atkinson para definir el valor de variables que a través de procesos termodinámicos (ecuaciones) ayudan a determinar las variables del resto de procesos.

Método Aproximado

Para definir las variables de ingreso se utiliza el mismo proceso de codificación que la mostrada en la **Figura 2.8**.

```

Cp=1.0052
Cv=0.7180
k=1.4
R=0.287 #[kJ/kgK]

#Estado1
ule = Cv*tT1e #Energía interna1
v1e = (R*tT1e)/tplee #Volumen especifico1
ts1e.configure(state='normal') #Entropia1
tphi1e.configure(state='normal') #Exergía1

#Estado 2
ts2e.configure(state='normal') #Entropia2
v2e=v1e/rc #Volumen específico2
tT2e = tT1e*(rc)**(k-1) #Temperatura2
ttp2e = (ttp1e)*((rc)**k) #Presión2
u2e = Cv*tT2e #Energía interna2
tphi2e.configure(state='normal') #Exergía2

#Estado 3
ts3e.configure(state='normal') #Entropia3
u3e = Cv*tT3e #Energía interna3
ttp3e = (ttp2e*tT3e)/(tT2e) #Presión3
v3e=v2e #Volumen específico3
tphi3e.configure(state='normal') #Exergía3

#Estado 4
ts4e.configure(state='normal') #Entropía4
ttp4e=ttp1e #Presión4
re=(ttp3e/ttp4e)**(1/k) #Relación de expansión
v4e=(v1e*re)/rc #Volumen específico4
tT4e = (tT1e*v4e)/v1e #Temperatura4
u4e = Cv*tT4e #Energía interna4
tphi4e.configure(state='normal') #Exergía2

```

Figura 2. 11 Código solución numérica método aproximado Parte 1.

```

#Calor de añadido
qae=u3e-u2e

#Calor rechazado
qre=Cp*(tT4e-tT1e)

#Trabajo neto
wneto=qae-qre

#Delta de energía interna 1-2
Δu12e=u2e-u1e

#Delta de energía interna 2-3
Δu23e=u3e-u2e

#Delta de energía interna 3-4
Δu34e=u4e-u3e

#Delta de energía interna 4-1
Δu41e=u1e-u4e

#Eficiencia
ηe=(1-(qre/qae))*100

```

Figura 2. 12 Código solución numérica método aproximado Parte 2.

En las **Figura 2.11** y **Figura 2.12** se describe el proceso de codificación para determinar las propiedades termodinámicas en los 4 estados del ciclo, este proceso termodinámico depende las ecuaciones de procesos isentrópicos y la ecuación de gases ideales. En primer lugar, se declara el valor de Cp, Cv y k, necesarios para el cálculo de energía interna y calores añadido y de rechazo

Interfaz gráfica con Tkinter

La interfaz gráfica es la que da la interactividad al usuario con los resultados del ciclo y con las gráficas de energía, entropía y exergía, por este medio se representa la información que se desea proporcionar y obtener, es por ello que su diseño es clave para el desarrollo del software.

Para iniciar con su elaboración, lo primero que se hace es importar su librería y demás funciones que serán de utilidad en el desarrollo **Figura 2.13**.

```

import tkinter as tk
from tkinter import*
from tkinter import messagebox as mb

```

Figura 2. 13 Librería y funciones Tkinter.

La **Figura 2.14** muestra el código para creación de la base de la interfaz gráfica, primero se crea la ventana principal con la función TK, después de asigna un color con la función config, se asigna un título principal para la ventana y con la función geometry se asigna el tamaño de la ventana.

```

raiz=Tk()
raiz.config(bg='NavajoWhite3')
raiz.title("Ciclo de Potencia Atkinson")
raiz.geometry("1300x800")

```

Figura 2. 14 Raíz de la interfaz gráfica.

Los Frams (**Figura 2.15**) son marcos o espacios colocados o distribuidos en diferentes secciones de la ventana principal, en este caso se los ha usado para poder colocar las gráficas de energía, entropía, exergía (frame: Frg) y la gráfica T-s (frame: Frts). La función place sirve para dar las diferentes ubicar a los frams.

```

#Frames

Frg=Frame(raiz,bg='NavajoWhite3',width='500',height='300') #Gráficas
Frg.place(x=750,y=20)

Frts=Frame(raiz,bg='NavajoWhite3',width='500',height='300') #Gráfica T-s
Frts.place(x=370,y=20)

```

Figura 2. 15 Frams asignados para los gráficos.

La función LabelFrame **Figura 2.16** se utiliza para crear estación o Frams pero con un carácter textual, dentro de ellos se puede contener otro tipo de Widgets, en este caso se los usa para de establecer secciones como en lugar en donde se ubican los label datos de entrada etc.

```

#Datos de entrada
datos=LabelFrame(raiz,bg="NavajoWhite3",text="Datos de entrada",fg="black",fc
datos.place(x=20,y=15)

#Condiciones ambientales
ca=LabelFrame(raiz,bg="NavajoWhite3",text="Condiciones ambientales",fg="black",fc
ca.place(x=20,y=240)

#Botones auxiliares
ba=LabelFrame(raiz,bg="NavajoWhite3",text="Botones auxiliares",fg="black",for
ba.place(x=20,y=360)

#Resultados
res=LabelFrame(raiz,bg="NavajoWhite3",text="Resultados en los 4 estados del c
res.place(x=20,y=443)

#Resultados del ciclo
resg=LabelFrame(raiz,bg="NavajoWhite3",text="Resultados del ciclo",fg="black"

```

Figura 2. 16 Label Frams para las diferentes secciones de la interfaz gráfica.

La **Figura 2.17** muestra el ejemplo de la creación del estado 1 y todos sus componentes, es decir, los espacios en los que se entregan los valores de las propiedades calculadas. Para esta sección primero se crea un LabelFrame llamado Estado 1 dentro del LabelFrame llamado Resultados, posteriormente se crea el espacio donde se imprimen los resultados con ayuda de la función Entry y con la función Grid se lo ubica dentro del espacio asignado. De la misma manera se crean las diferentes secciones con sus diferentes componentes

```
#Estado 1
E1=LabelFrame(res,bg="NavajoWhite3",text="Estado 1",fg="black",font=("Times Ne
E1.grid(column=1,row=0)

t1le=Entry(E1,width=8,fg="black",font=("Times New Roman",15))
t1le.grid(column=1,row=0,pady=1)
t2le=Entry(E1,width=8,fg="black",font=("Times New Roman",15))
t2le.grid(column=1,row=1,pady=1)
t3le=Entry(E1,width=8,fg="black",font=("Times New Roman",15))
t3le.grid(column=1,row=3,pady=1)
t4le=Entry(E1,width=8,fg="black",font=("Times New Roman",15))
t4le.grid(column=1,row=4,pady=1)
t5le=Entry(E1,width=8,fg="black",font=("Times New Roman",15))
t5le.grid(column=1,row=5,pady=1)
t6le=Entry(E1,width=8,fg="black",font=("Times New Roman",15))
t6le.grid(column=1,row=6,pady=1)
```

Figura 2. 17 Ejemplo de creación de los componentes de los diferentes Estados.

Creación de los diagramas interactivos

En la **Figura 2.18** se muestra el código para importar la librería Matplotlib y sus funciones.

```
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import (FigureCanvasTkAgg, NavigationToolbar2Tk)
```

Figura 2. 18 librería Matplotlib.

Para crear los gráficos interactivos se utiliza la librería Matplotlib. Esta librería cuenta con los parámetros necesarios para crear cualquier grafico en 2D. Primero se crea una figura (**Figura 2.19**) dentro del Frame seleccionado para este propósito. El tamaño de esta figura se establece en pulgadas con ayuda de la función dpi, en este caso se define con un valor de 75. Se establecen los arreglos para graficar las líneas del plano cartesiano y posteriormente se los dibuja con la función plot. Con la función Text se añade el nombre a cada eje. La función Circle ayuda a establecer las dimensiones de la circunferencia en el centro del plano. La función FigureCanvasTkAgg es la que ayuda a establecer el enlace entre la interfaz creada con Tkinter y figura creada con Matplotlib al añadir la figura al frame Frg. Por último, la función NavigationToolbar2Tk establece una barra de herramientas al gráfico.


```

#Gráfico base para Energía, Entropía y Exergía
fig,ax=plt.subplots(figsize=(7,6),dpi=75)
ax.axis('off')
x1,y1=[150,300],[150,150]
x2,y2=[150,150],[150,0]
x3,y3=[150,-50],[150,150]
x4,y4=[150,150],[150,325]
ax.plot(x1,y1,color='black',ls='--',alpha=0.3)
ax.plot(x2,y2,color='black',ls='--',alpha=0.3)
ax.plot(x3,y3,color='black',ls='--',alpha=0.3)
ax.plot(x4,y4,color='black',ls='--',alpha=0.3)
ax.set_title('Diagramas de Resultados',style='italic',fontsize='13',color='red')
ax.text(310,145,'E1',color='black')
ax.text(145,-10,'E2',color='green')
ax.text(-70,145,'E3',color='red')
ax.text(145,330,'E4',color='purple')
circulo=plt.Circle((150,150),50,fill=False,color='black')
ax.add_artist(circulo)
line=FigureCanvasTkAgg(fig,Frg)
line.get_tk_widget().pack()
toolbar=NavigationToolbar2Tk(line,Frg)
toolbar.update()
line.draw()

```

Figura 2. 19 Código para la creación de la gráfica base.

Ahora como se menciona anteriormente se necesita realizar una linealización en cada cuadrante dentro de un ciclo for ya que esta ecuación dibuja un punto según el ángulo se incrementa, a continuación, se muestra la sección del código para este apartado.

```

for i in range(102):
    if angulo>=0 and angulo<(0.5*pi): #E1-E4

        #Punto inicio
        x0=(50*(np.cos(angulo)))+150
        y0=(50*(np.sin(angulo)))+150

        un=(ulee+((u4ee-ulee)*(angulo/(0.5*pi))))*es
        uz=u4ee*es

        #Energía interna
        x5=((50+un)*(np.cos(angulo)))+150
        y5=((50+un)*(np.sin(angulo)))+150

        #Calor rechazado
        x3=((50+uz)*(np.cos(angulo)))+150
        y3=((50+uz)*(np.sin(angulo)))+150

        x1=None
        y1=None
        x2=None
        y2=None
        x4=None
        y4=None

        xf,yf=[x0,x5],[y0,y5]
        xg,yg=[x0,x3],[y0,y3]

        ax.plot(xg,yg,color='violet',ls='-',alpha=1)
        ax.plot(xf,yf,color='red',ls='-',alpha=1)

```

Figura 2. 20 Ejemplo: código para la ecuación de gráfico de energía en el primer cuadrante.

Como se muestra en la **Figura 2.20** se desarrollan los cuadrantes 3, 2 y 1 para el resto de las gráficas, entropía, exergía y energía por el método aproximado.

Desarrollo del ejecutable

Para realizar el ejecutable del software se toma en cuenta una consideración, es importante que todas las imágenes e iconos incluidos sean empaquetados, ya que estas no son reconocidas y se genera un error, para ello se utiliza una función de empaquetamiento mostrada en la **Figura 2.21**.

```
#Empaquetamiento de imagenes
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)
```

Figura 2. 21 Función empaquetamiento de imágenes.

Por medio de la consola que se encuentra en el ordenador (símbolo de sistema) se instalan ciertos parámetros para la posterior instalación, Primero por medio de la consola se debe ingresar a la carpeta de origen donde se encuentra el archivo .py junto a sus imágenes, luego por medio de la consola y con el comando `pip install virtualenv` se instala el paquete `env`, posteriormente con el comando `virtualenv` se crea la carpeta `env`, para que funcione adecuadamente se ingresa por medio de la consola a la carpeta `Scripts` ubicada en la carpeta `env` y se ejecuta el comando `activate`, se ejecuta el comando `pip install pyinstaller`, este comando es el que posteriormente ayuda a convertir el archivo `py` a `exe`, por último se ejecuta el comando `pip install auto-py-to-exe` que es el entorno en donde se crea el ejecutable, se abre la ventana con el comando `auto-py-to-exe`, y se llenan los parámetros requeridos. A continuación, en la **Figura 2.22** se muestra el entorno `auto-py-to-exe`.

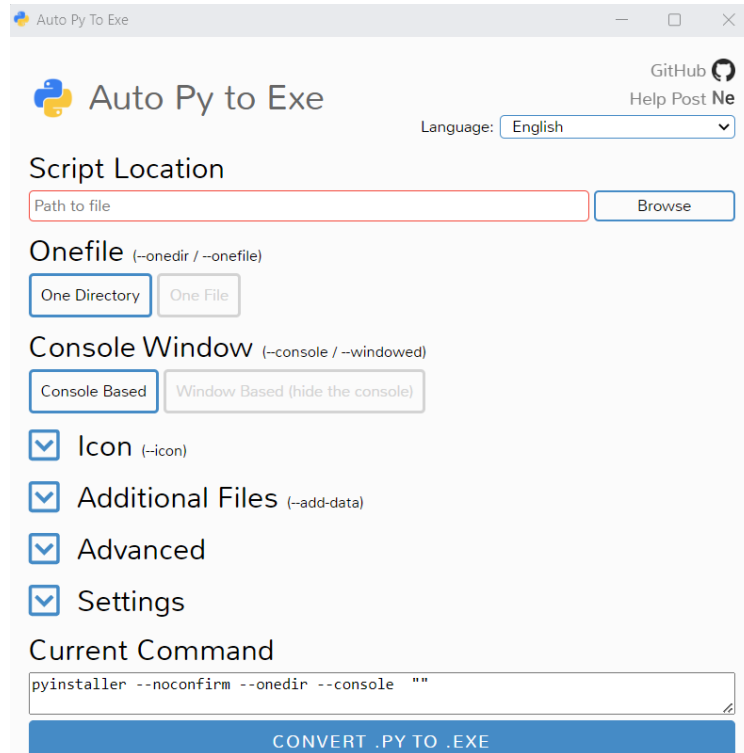


Figura 2. 22 Entorno auto-py-to-exe.

En la **Figura 2.22** se observa el entorno *auto-py-to-exe*, en la sección *Script Location* se coloca la ubicación del archivo *py*, en *icono* se coloca la ubicación del icono que debe estar en formato *ico* y si se tiene alguna imagen se la ubica en la sección *Additional Files*, posteriormente se da click en *Convert .py to .exe* y se obtiene el ejecutable.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En este apartado se analiza la eficacia del software, es decir, si sus resultados son válidos, para ello se realiza la validación de resultados a través de una comparativa entre el desarrollo analítico (desarrollo manual), el software diseñado y por último una comparativa con el software *TermoGraf*, con estos resultados se analiza el error. En este capítulo también se realiza un análisis de sensibilidad, con este análisis se determina los cambios que sufren las variables cuando se cambian ciertos datos de entrada.

Análisis de error

Comparación de resultados con el Método exacto

En este apartado se realiza la comparación entre resultados, pero como se menciona

anteriormente algunos valores de variables son distintos porque CoolProp y las tablas de Cengel nos dan valores diferentes, por este motivo se analiza la variación de entropía, energía interna, calores de adición y rechazo.

Para la comparación con los 3 procesos se toma como base datos aleatorias, ya que encontrar bibliografía con ejemplos resueltos confiables con respecto a este ciclo de potencia es muy difícil, se tienen los siguientes datos:

- r : 10
- T_1 : 298 [K]
- T_3 : 1473 [K]
- P_1 : 70 [kPa]
- P_a : 80 [kPa]
- T_a : 293 [K]

Tabla 3. 1 Análisis de error para el método exacto.

Método Exacto						
Propiedad	Unidad	Software	Análítico	TermoGraf	Error Analítico %	Error TermoGraf %
q_a	[kJ/kg]	646.4	647.9	647.28	0.23	0.14
q_r	[kJ/kg]	247.4	248.68	248.42	0.52	0.41
W_{neto}	[kJ/kg]	399	399.22	398.86	0.06	0.04
Δu_{1-2}	[kJ/kg]	321.11	320.29	320.08	0.26	0.32
Δu_{2-3}	[kJ/kg]	646.4	647.93	647.28	0.24	0.14
Δu_{3-4}	[kJ/kg]	-789.91	-789.33	-789.04	0.07	0.11
Δu_{4-1}	[kJ/kg]	-177.6	-178.52	-178.32	0.52	0.41
Δs_{1-2}	[kJ/kg* K]	0	0	0	0.00	0.00
Δs_{2-3}	[kJ/kg* K]	0.6	0.6	0.607	0.00	1.17
Δs_{3-4}	[kJ/kg* K]	0	0	0	0.00	0.00
Δs_{4-1}	[kJ/kg* K]	-0.6	-0.6	-0.607	0.00	1.17
$\Delta \phi_{1-2}$	[kJ/kg]	233.15	234.32	208.64	0.50	10.51
$\Delta \phi_{2-3}$	[kJ/kg]	468.78	467.93	466	0.18	0.58
$\Delta \phi_{3-4}$	[kJ/kg]	-622.18	-623.56	-576.14	0.22	7.40
$\Delta \phi_{4-1}$	[kJ/kg]	-79.75	-78.98	-98.54	0.97	23.56

En la **Tabla 3.1** se enlista los resultados obtenidos por los tres métodos: software desarrollado, método analítico y TermoGraf, se observa que la mayoría de las propiedades

no presentan un gran cambio y tampoco presentan un gran margen de error, pero hay valores que presentan algún cambio significativo y eso se da con TermoGraf en los valores de variación de exergía, el mayor error se presenta en el estado de 1 a 2 con un 10.51%, mientras que por el método analítico el error más alto es del 0.52 que se presenta en el calor de rechazo. Los errores mostrados son los errores relativos con respecto al software desarrollado.

Comparación de resultados con el método aproximado

A diferencia del método exacto, en el método aproximado se puede hacer una comparativa de todas sus variables porque estas son resueltas a partir de ecuaciones y no de valores tabulados.

Tabla 3. 2 Análisis de error para el método aproximado

Método Aproximado				
Propiedad	Unidad	Software	Analítico	Error Analítico %
qa	[kJ/kg]	520.16	520.16	0.00
qr	[kJ/kg]	186.25	186.63	0.20
Wneto	[kJ/kg]	333.91	333.53	0.11
u1	[kJ/kg]	213.96	213.96	0.00
u2	[kJ/kg]	537.45	537.45	0.00
u3	[kJ/kg]	1057.61	1057.61	0.00
u4	[kJ/kg]	347	347.30	0.09
P1	[kPa]	70	70	0.00
P2	[kPa]	1758.32	1758.32	0.00
P3	[kPa]	3460.07	0	0.00
P4	[kPa]	70	70	0.00
T1	[K]	298	298	0.00
T2	[K]	748.54	748.54	0.00
T3	[K]	1473	1473	0.00
T4	[K]	483.29	483.7	0.08

En la **Tabla 3.2** se muestra el error relativo entre la solución analítica y la desarrollado por el software, se observa que los errores son tan pequeños que podrían ser despreciables, el valor con mayo error es el de calor de rechazo con un 0.20 %, esto puede ser debido a que el software considera todos los desimananes, mientras que en la solución manual no siempre se puede tomar en cuenta todos los valores decimales.

Exponer los resultados obtenidos, utilizando para esto el apoyo de tablas, figuras, entre otros.

3.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta que permite determinar el comportamiento del ciclo de potencia Atkinson en sus estados, al variar ciertos parámetros de entrada se visualiza por medio de los diagramas interactivos y los datos de salida cuales son los parámetros que aumentan o disminuyen. Los datos de entrada que se escogen para este análisis son la relación de compresión y la temperatura en el estado 3.

Análisis de sensibilidad al variar la relación de compresión (r)

En el marco teórico se explica que la relación de compresión es un parámetro muy importante para considerar en el ciclo de potencia Atkinson, a mayor relación de compresión se obtiene un mayor trabajo en el estado de expansión y por tanto se tiene un menor calor de rechazo, es decir que se aprovecha más el trabajo al convertirse en energía mecánica.

Los datos utilizados son los mismos enunciados anteriormente para el análisis de errores, pero esta vez se analiza los gráficos interactivos con dos relaciones de compresión.

Tabla 3. 3 Datos para el análisis de sensibilidad.

Datos entrada	Relaciones de compresión
<p>T1: 298 [K] T3: 1473 [K] P1: 70 [kPa] Pa: 80 [kPa] Ta: 293 [K]</p>	<p>r: 8 (gráfico azul) r: 13 (gráfico naranja)</p>

Tabla 3. 4 Tabla de análisis de resultados al variar la relación de compresión (método exacto).

Método exacto

Variables		r = 8	r = 13	Análisis
Temperatura [K]	T1	298	298 [K]	Se mantiene
	T2	670.63	800.41	Aumenta
	T3	1473	1473.0	Se mantiene
	T4	575.56	502.57	Disminuye
Volumen específico [m ³ /kg]	v1	1.22	1.22	Se mantiene
	v2	0.15	0.09	Disminuye
	v3	0.15	0.09	Disminuye
	v4	2.36	2.06	Disminuye
Presión [kPa]	P1	70	70	Se mantiene
	P2	1266.43	2466.12	Aumenta
	P3	2786.61	4546.74	Aumenta
	P4	70	70	Se mantiene
Entropía [kJ/kg.K]	s1	3.99	3.99	Se mantiene
	s2	3.99	3.99	Se mantiene
	s3	4.66	4.52	Disminuye
	s4	4.66	4.52	Disminuye
Energía interna [kJ/kg]	u1	338.84	338.84	Se mantiene
	u2	614.93	717.9	Aumenta
	u3	1306.44	1306.2	Se mantiene
	u4	542.54	487.76	Disminuye
Exergía [kJ/kg]	φ1	1.03	1.03	Se mantiene
	φ2	191.61	289.87	Aumenta
	φ3	686.57	722.86	Aumenta
	φ4	99.32	61.81	Disminuye
Resultados del ciclo	qa	691.51	588.31	Disminuye
	qr	283.44	207.7	Disminuye
	Wneto	408.07	380.61	Disminuye
	η	59.01	64.7	Aumenta

Tabla 3. 5 Tabla de análisis de resultados al variar la relación de compresión (método aproximado).

Método aproximado				
Variables		r = 8	r = 13	Análisis
Temperatura [K]	T1	298	298 [K]	Se mantiene
	T2	684.62	831.37	Aumenta
	T3	1473	1473.0	Se mantiene
	T4	515.1	448.39	Disminuye
Volumen específico [m ³ /kg]	v1	1.22	1.22	Se mantiene
	v2	0.15	0.09	Disminuye
	v3	0.15	0.09	Disminuye
	v4	2.11	1.84	Disminuye
Presión [kPa]	P1	70	70	Se mantiene
	P2	1286.54	2538.74	Aumenta
	P3	2768.05	4498.09	Aumenta
	P4	70	70	Se mantiene
Energía interna [kJ/kg]	u1	213.96	213.96	Se mantiene
	u2	491.56	596.92	Aumenta
	u3	1057.61	1057.61	Se mantiene
	u4	369.61	321.94	Disminuye
Resultados	qa	566.05	460.69	Disminuye
	qr	218.23	151.17	Disminuye

del ciclo	Wneto	347.82	309.52	Disminuye
	η	61.45	67.19	Aumenta

Diagrama de Energía

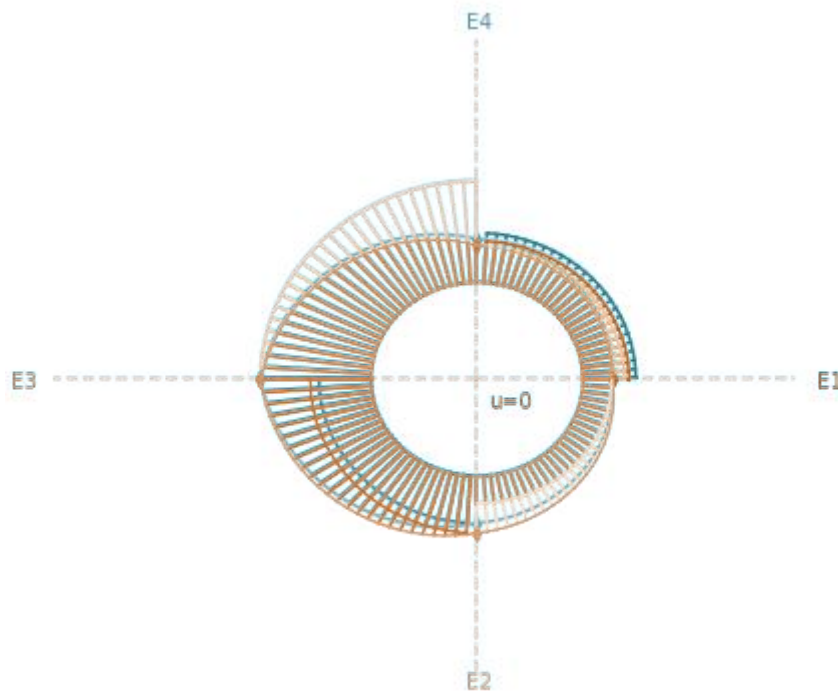


Figura 3. 1 Diagrama de energía, comparación relación de compresión.

Antes de empezar con el análisis, es importante mencionar que se asume que se utilizan dos diferentes combustibles, es decir uno de mejor calidad que el otro, es por esta razón que la temperatura en el estado 3 se mantiene constante y su calor añadido varía.

En la **Figura 3.1** de la relación de compresión de 13 (gráfico naranja) con respecto a 8 (gráfico azul), no se nota un mayor cambio en la variación de energía, del proceso 1 (estados de 1 – 2), se observa que el trabajo de compresión 1-2 es menor (tiene una menor área), en el proceso 2 (estados de 2 a 3) el trabajo añadido es más pequeño (tiene una menor área), en el proceso 3 (estados de 3 a 4) se tiene que el trabajo de expansión es más grande (tiene una mayor área), en el proceso de 4 (estados de 4 a 1) el calor rechazado es más pequeño (tiene una menor área) y el trabajo de compresión 4-3 también disminuye.

De la **Tabla 3.4** con respecto a la energía se deduce lo siguiente:

Los datos nos muestran que las presiones en los estados 2 y 3 son mucho mayores, como la relación de compresión es más grande, el pistón produce una mayor presión, a mayor presión también se tiene un aumento de temperaturas como se observa en la temperatura 2, al tener estos parámetros elevados es de esperarse que se realice un mayor trabajo en el proceso de

expansión, es decir, la energía es mayormente aprovechada convirtiéndola en energía mecánica, por esta razón su calor rechazo disminuye al igual que su trabajo neto, dando como resultado un mayor aumento de la eficiencia. La relación de compresión afecta principalmente a los estados 2 y 4, se ve en la tabla que los valores en los estados 1 y 3 se mantienen o no varían en mayor medida.

Diagrama de entropía

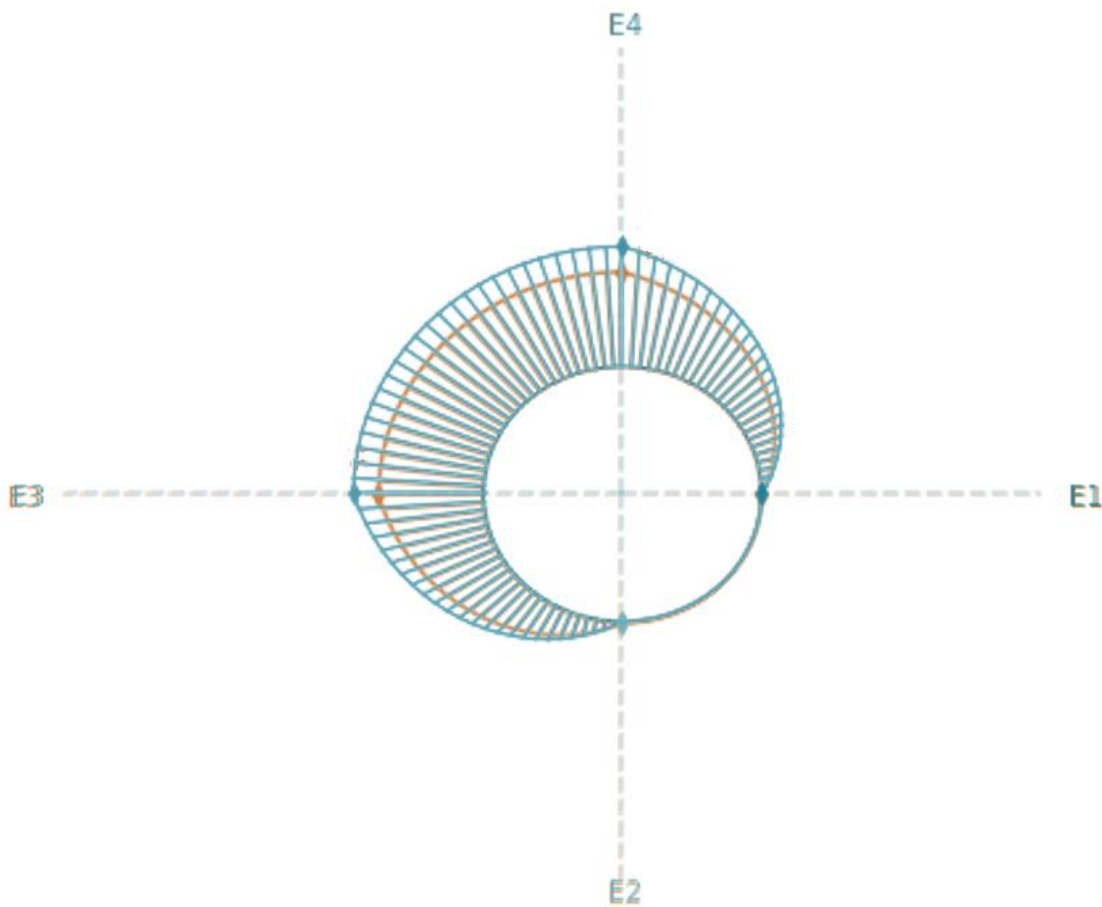


Figura 3. 2 Diagrama de entropía, comparación relación de compresión.

De la **Figura 3.2** y **Tabla 3.4** se observa que la entropía con una relación de compresión de 13 en comparación con la relación de compresión de 8, en los estados 3 y 4 disminuye, esto se debe a que los calores son más pequeños y las temperaturas más altas, mientras que en los estados 1 y 2 permanece consta, se puede ver entonces que el cambio de relación de compresión al ser más grande afecta directamente a los estados 3 y 4.

Diagrama de exergía

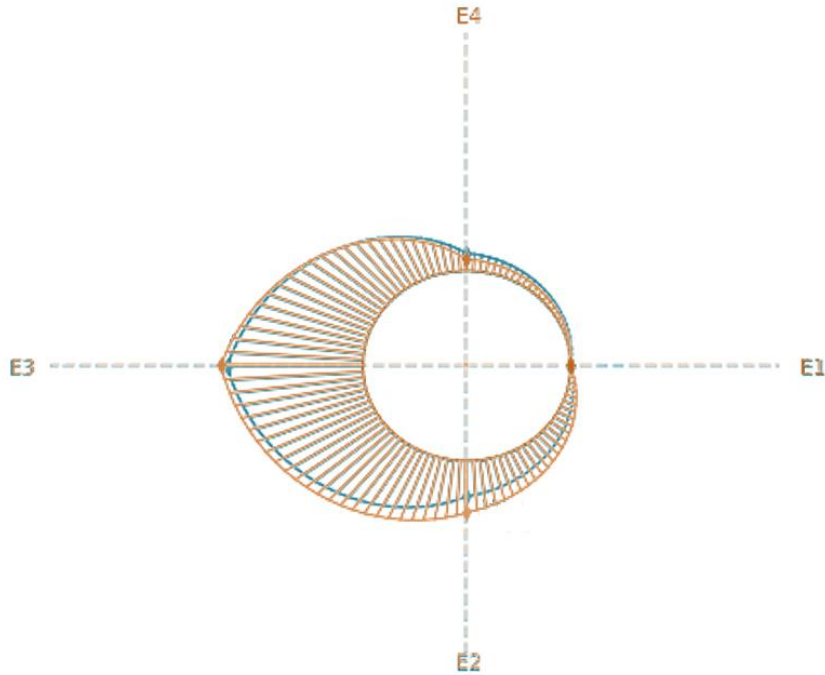


Figura 3. 3 Diagrama de exergía, comparación relación de compresión.

De la **Figura 3.3** y **Tabla 3.4** se observa que al comparar los datos obtenidos de la relación de compresión de 13 con respecto a 8, la exergía en el estado 1 se mantiene constante, en los estados 2 y 3 aumenta y por último en el estado 4 disminuye, esto quiere decir que el trabajo mínimo necesario para que se del estado de energía es mayor en los estados 2 y 3, mientras que el estado 4 se necesita menos trabajo útil.

En la **Tabla 3.5** se muestran los resultados para el método aproximado, como se puede observar sus valores con respecto al método exacto varían, otros se mantienen iguales, esto se debe a que el método aproximado utiliza la ecuación de los gases ideales, pero en lo que al análisis de sensibilidad con respecto a la relación de compresión se refiere, mantiene la misma tendencia que el método exacto, es decir que los valores de sus variables se mantienen constante, aumentan o disminuyen de igual manera que el método exacto.

Análisis de sensibilidad al variar la temperatura en estado 3 (T3)

En esta sección se analiza como repercute la temperatura 3 en procesos del ciclo Atkinson, en que afecta su variación, que sucede si es más grande o más pequeña, a que propiedades afectas, los datos de entrada para este análisis son los mismos que en el apartado anterior, en este caso se utiliza la relación de compresión de 12 y se usan 2 temperaturas para el estado 3 diferentes, se muestran a continuación:

Tabla 3. 6 Datos para el análisis de sensibilidad.

Datos entrada	Temperaturas en el estado 3
r: 12 T1: 298 [K] P1: 70 [kPa] Pa: 80 [kPa] Ta: 293 [K]	T3: 1000 [K] (gráfico azul) T3: 1450 [K] (gráfico naranja)

Tabla 3. 7 Tabla de análisis de resultados al variar la temperatura en el estado 3 (método exacto).

Método exacto				
Variables		T3 = 1000 [K]	T3 = 1450 [K]	Análisis
Temperatura [K]	T1	298	298 [K]	Se mantiene
	T2	777.73	777.73	Se mantiene
	T4	366.63	506.86	Aumenta
Volumen específico [m ³ /kg]	v1	1.22	1.22	Se mantiene
	v2	0.1	0.1	Se mantiene
	v3	0.1	0.1	Se mantiene
	v4	1.5	2.08	Disminuye
Presión [kPa]	P1	70	70	Se mantiene
	P2	2210.1	2210.1	Se mantiene
	P3	2844.57	4127.99	Aumenta
	P4	70	70	Se mantiene
Entropía [kJ/kg.K]	s1	3.99	3.99	Se mantiene
	s2	3.99	3.99	Se mantiene
	s3	4.2	4.53	Aumenta

	s4	4.2	4.53	Aumenta
Energía interna [kJ/kg]	u1	338.84	338.84	Se mantiene
	u2	699.62	699.62	Se mantiene
	u3	884.5	1285.08	Se mantiene
	u4	388.27	490.95	Aumenta
Exergía [kJ/kg]	φ1	1.03	1.03	Se mantiene
	φ2	272.22	272.22	Se mantiene
	φ3	395.91	699.79	Aumenta
	φ4	11.82	63.84	Aumenta
Resultados del ciclo	qa	184.88	585.46	Aumenta
	qr	69.16	212.12	Aumenta
	Wneto	115.72	373.34	Aumenta
	η	62.59	63.77	Aumenta

Tabla 3. 8 a de análisis de resultados al variar la temperatura en el estado 3 (método aproximado).

Método aproximado				
Variables		T3 = 1000 [K]	T3 = 1450 [K]	Análisis
Temperatura [K]	T1	298	298 [K]	Se mantiene
	T2	805.17	805.17	Se mantiene
	T4	347.89	453.63	Aumenta
Volumen específico [m³/kg]	v1	1.22	1.22	Se mantiene
	v2	0.1	0.1	Se mantiene
	v3	0.1	0.1	Se mantiene
	v4	1.43	1.86	Aumenta
Presión [kPa]	P1	70	70	Se mantiene
	P2	2269.61	2269.61	Se mantiene
	P3	2818.79	4087.25	Aumenta
	P4	70	70	Se mantiene
Energía interna [kJ/kg]	u1	213.96	213.96	Se mantiene
	u2	578.11	578.11	Se mantiene
	u3	718	1041.1	Se mantiene
	u4	249.78	325.71	Aumenta
Resultados del ciclo	qa	139.89	462.99	Aumenta
	qr	50.15	156.44	Aumenta
	Wneto	89.74	306.55	Aumenta
	η	64.15	66.21	Aumenta

Diagrama de energía

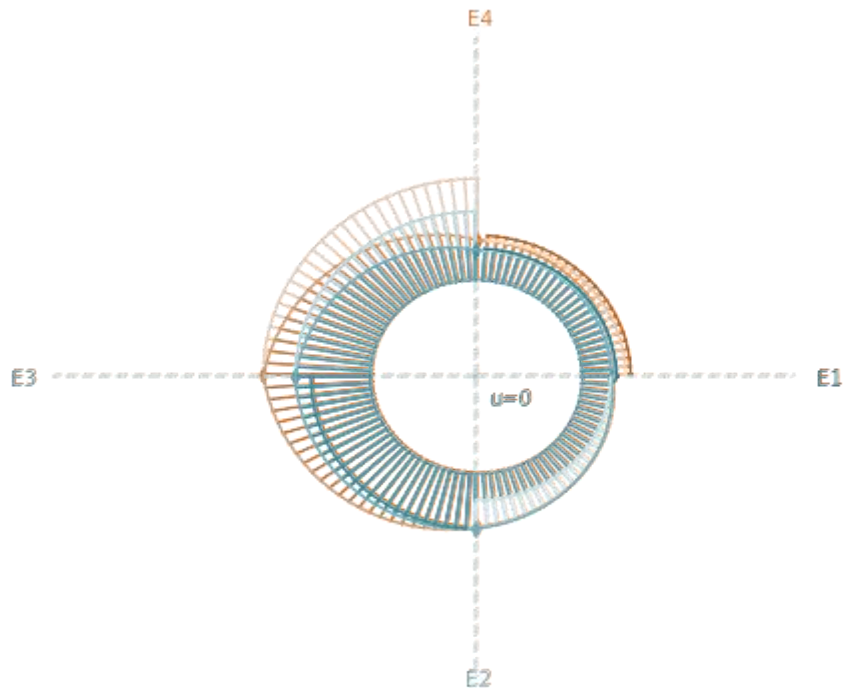


Figura 3. 4 Diagrama de energía, comparación temperatura en el estado 3.

Los datos que se utilizan se los toma de esa manera para que el efecto de variación sea mas notorio. Como se hizo para el análisis anterior también se asume que se utilizan diferentes combustibles, uno de mejor calidad que el otro, por ello su calor añadido es diferente.

El gráfico azul representa la temperatura $T_3=1000$ y el gráfico naranja representa a la temperatura $T_3=1450$

De la **Figura 3.4** y **Tabla 3.7** se observa que en todas las variables en los estados 1 y 2 se mantienen constantes, es decir que el aumento o disminución de las temperatura, no repercute en estos estados, mientras que en los estados 3 y 4 el valor de todas las variables aumenta al aumentar la temperatura, la energía en el estado 3 es la que más aumento tiene, en la gráfica se puede ver que el trabajo de expansión es mucho más grande, al igual que el calor de rechazo, el calor añadido y el trabajo de compresión 4-1 , por esta razón es normal que el trabajo neto también aumente, y con ello la eficiencia es más grande, aunque al visualizar los valores en la tabla, se nota que la eficiencia entre las dos temperaturas no es tan grande, pero esto demuestra que a mayor temperatura, mayor será la eficiencia.

Diagrama de entropía

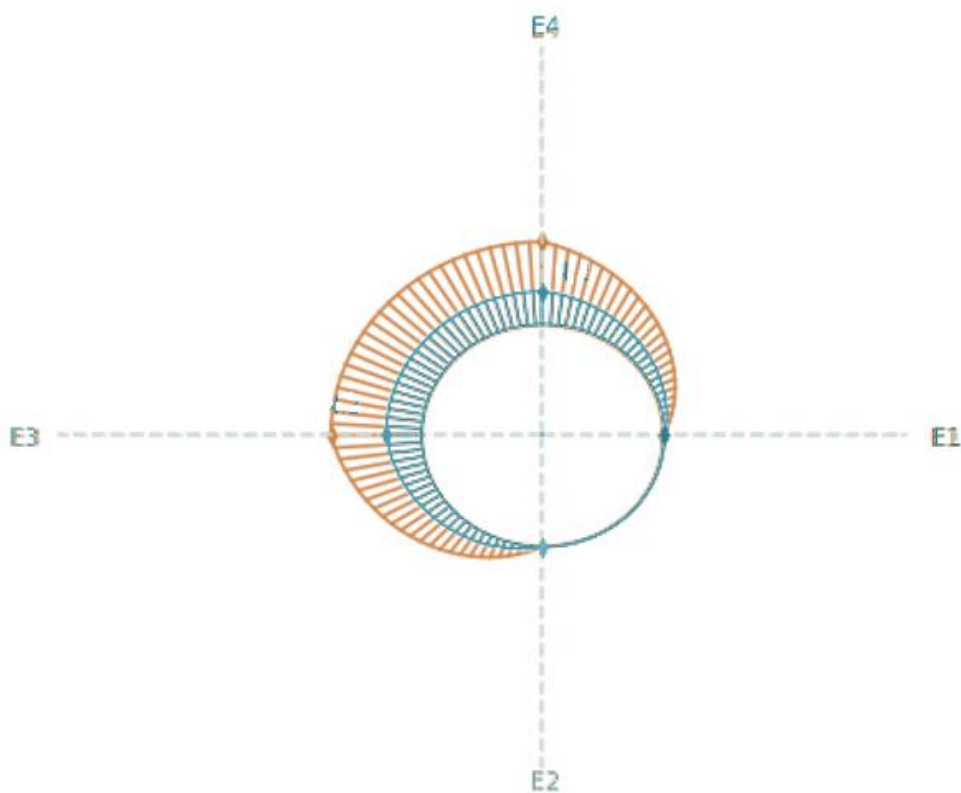


Figura 3. 5 Diagrama de entropía, comparación temperatura en el estado 3.

De la **Figura 3.5** y **Tabla 3.7** se observa que el valor de la entropía en el estado 3 y 4 aumenta considerablemente, lo que quiere decir que la temperatura 3 afecta en gran medida al aumento de entropía en el sistema, pero la variación de esta se mantiene constante en los estados 1 y 2, lo que quiere decir que la temperatura 3 no es valor que afecte al proceso de compresión que se da en los estados de 1 a 2.

Diagrama de Exergía

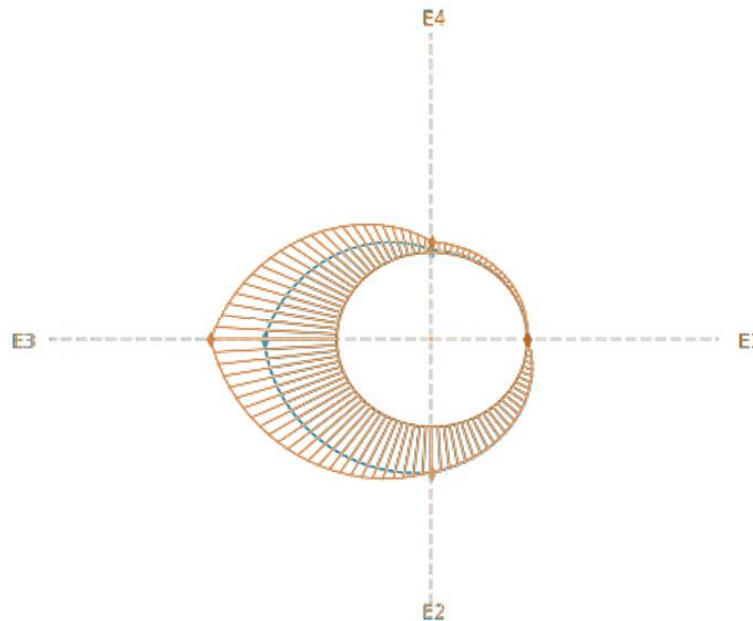


Figura 3. 6 Diagrama de exergía, comparación temperatura en el estado 3.

De la **Figura 3.5** y **Tabla 3.7** se observa que la exergía en los estados 1 y 2 se mantienen constantes, es decir que independientemente de si la temperatura es mayor o menor, no afecta a los estados mencionados, pero se observa que la exergía aumenta en los estados 3 y 4, lo que quiere decir que el trabajo mínimo útil para que se produzcan esos estados es más grande.

3.3 Conclusiones

Se cumple con el objetivo propuesto que es desarrollar el módulo del ciclo de potencia Atkinson para la aplicación informática de diagramas interactivos, es decir se genera un software eficiente a la hora de desarrollar diagramas interactivos orientados a la resolución del ciclo Atkinson. Utilizando los métodos propuestos exacto, aproximado y teniendo como sustancia al gas ideal, permite interpretar qué sucede en cada proceso del ciclo.

La información correspondiente al ciclo de potencia Atkinson en la bibliografía es escasa. Por esto no se ha tenido la facilidad de búsqueda como en otros ciclos desarrollados. Sin embargo, a partir de información básica obtenida a través de papers, sitios webs, etc, que describen el ciclo adecuadamente, se ha podido entender y modelar correctamente este ciclo de potencia para su desarrollo como herramienta informática.

Python resultó ser una herramienta informática muy apropiada para el desarrollo numérico

y de la interfaz gráfica de los diagramas interactivos de energía, entropía y exergía del ciclo de potencia Atkinson, software que ha sido desarrollado con una proyección modular. La solución numérica se basa en las ecuaciones termodinámicas que corresponden al método aproximado y en la librería CoolProp para el método exacto. Las propiedades termodinámicas en los estados del ciclo y en algunos casos las diferencias de estas propiedades constituyen la base para el desarrollo e interpretación de los diagramas interactivos. La representación de la interfaz gráfica del ciclo Atkinson está sustentada en la librería Tkinter y en los desarrollos previos de los ciclos Otto y Diesel.

Para el desarrollo de este software, se ha implementado una representación gráfica, que se basa en los módulos previos ya desarrollados. El formato para los gráficos de energía, exergía, entropía, utiliza un concepto propio desarrollado por los autores del ciclo DT-Diesel y DT-Otto en colaboración con el director de tesis, en base a esta información proporcionada se ha desarrollado eficazmente la interpretación numérica del ciclo de potencia Atkinson de manera gráfica.

EL software desarrollado, es una herramienta didáctica para el usuario, es fácil entender su funcionamiento por su interactividad, es agradable a la vista, cuenta con 3 secciones, una para el ingreso de datos, otra para ver la salida numérica de resultados y la última para visualizar los resultados de energía, entropía y exergía gráficamente. Al tener pocas secciones resulta no ser tan difícil el aprender a usarlo.

Previo al desarrollo del software y sus diagramas interactivos, se ha recopilado información acerca de cómo desarrollarlo adecuadamente a través de Python, qué librerías utilizar para dar comienzo a la programación, son varias las librerías utilizadas, pero entre las principales destacan Tkinter para el desarrollo de la interfaz gráfica y Matplotlib para el desarrollo interactivo de los diagramas de energía, entropía y exergía.

Para el análisis de sensibilidad se determinó qué variables son las que mayor repercusión tienen en el ciclo, cuales son las variables de entrada que al cambiarlas modifican significativamente todo el sistema, estas variables son la relación de compresión y la temperatura en el estado 3. La relación de compresión es una variable que al ser menor presenta en el ciclo un mayor calor de rechazo un menor trabajo en el proceso de expansión y consecuentemente disminuye la eficiencia del ciclo.

El modelar el ciclo de potencia Atkinson resulta ser no solo algo novedoso, sino también útil para las personas que estudian ingeniería, ya que por medio del software se puede entender de forma adecuada como funciona el ciclo, al variar sus parámetros de entrada y

por medio de los resultados numéricos y gráficos obtenidos, se consigue entender que factores influyen en los procesos termodinámicos del ciclo, complementando el aprendizaje.

El software cuenta con un manual de usuario donde especifican como entender su correcto funcionamiento, que proceso realiza cada botón, como se deben ingresar los datos de entrada, que resultados se obtienen de él.

3.4 Recomendaciones

El recopilar información adecuada es de suma importancia, ya que de ella depende la correcta ejecución del desarrollo del software del ciclo. La adecuada recopilación de información es el punto de partida para desarrollar el análisis numérico, la interfaz grafica y los diagramas interactivos.

Es importante que al momento de introducir los datos de entrada, se los coloque en las unidades dispuestas, para posteriormente no tener errores o datos incoherentes y gráficas que no tengan ningún sentido.

Realizar el proceso de desarrollo de manera ordenada, esto es de importancia ya que el tener todos los apuntes en orden ayuda a un mejor entendimiento futuro, es mucho mas importante aplicar esta recomendación en el desarrollo del software porque se tiene una extensa cantidad de líneas de código que al no ser clasificadas en secciones conllevan a futuras confusiones.

Fomentar el uso de herramientas informáticas para el entendimiento de los ciclos termodinámicos, es recomendable para las personas que estudian ingeniería porque permite el correcto entendimiento de los ciclos y resulta mas entretenido aprender por medio de softwares didácticos e interactivos.

Para el análisis de senilidad es recomendable realizar otro tipo de pruebas, como varias. Las posibilidades de realizar diversas pruebas de sensibilidad son muy amplias, por lo que se recomienda realizar otro tipo de pruebas a las presentadas, como por ejemplo variar la relación de compresión y mantener el calor añadido constante modificando la temperatura en el estado 3 adecuadamente, lo que podría interpretarse como mantener la misma calidad de combustible y cambiar únicamente la relación de compresión.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Sagastume, “COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA PRIUS”, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2016.
- [2] SENER, “El ciclo Atkinson y su presencia en vehículos híbridos”, https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/transporte/fichastecnicas/Ciclo_Atkinson-1.pdf, enero de 2020.
- [3] MTE-THOMSON, “¿Cómo funciona el motor de ciclo Atkinson?”, <https://mte-thomson.com/es/?noticias=como-funciona-el-motor-de-ciclo-atkinson#:~:text=En%20la%20fase%20de%20compresi%C3%B3n,abajo%20con%20las%20v%C3%A1lvulas%20cerradas.>, el 29 de marzo de 2022.
- [4] Y. Cengel y M. Boles, TERMODINÁMICA, Octava edición. 2015.
- [5] I. Martínez, Termodinámica Básica y Aplicada. Madrid: DOSSAT, S.A., 1992.
- [6] P. Corcuera, “Introducción a la programación en Python”, <https://personales.unican.es/corcuerp/python/Slides/IntroPython.pdf>.
- [7] N. Nole, “DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS INTERACTIVOS DEL CICLO DE POTENCIA OTTO”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [8] A. Encalada, “DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS INTERACTIVOS DEL CICLO DIESEL”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.

5 ANEXOS

ANEXO I. Software ciclo de potencia Atkinson. Diagrama interactivo de energía por el metodo exacto.

Datos de entrada

r relación de compresión

T1 [K]

P1 [Pa]

T3 [K]

Ciclo de Potencia Atkinson Gráfico T-s

Diagrama de Energía

Condiciones ambientales

Presión Atmosférica [Pa]

Temperatura Ambiente [K]

Métodos de cálculo

Método exacto

Método aproximado

Botones auxiliares

Resultados en los 4 estados del ciclo

Variables	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Unidades
Temperatura (T)	299.0	756.66	2262.0	773.91	[K]
volumen (v)	0.97	0.09	0.09	2.51	[m³/kg]
Presión (P)	88.44	2484.68	7447.11	88.44	[kPa]
Entropía (s)	3.92	3.92	4.91	4.91	[kJ/kg.K]
Energía Interna (u)	339.52	682.49	2058.52	697.6	[kJ/kg]
Exergía (φ)	0.65	275.31	1359.19	186.04	[kJ/kg]

Método Usado

EXACTO

Resultados del ciclo

η	64.06	[%]	Δu12	342.97	[kJ/kg]
wneto	881.54	[kJ/kg]	Δu23	1376.03	[kJ/kg]
qa	1376.03	[kJ/kg]	Δu34	-1360.92	[kJ/kg]
qr	494.49	[kJ/kg]	Δu41	-358.08	[kJ/kg]

ANEXO II. Software ciclo de potencia Atkinson. Diagrama interactivo de entropía por el metodo exacto.

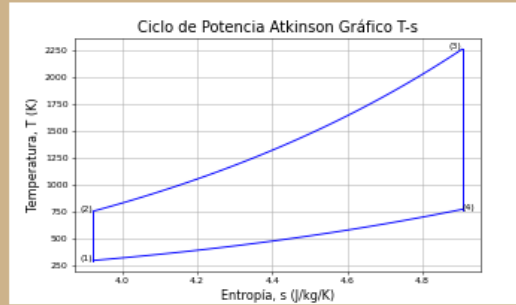
Datos de entrada

r relación de compresión

T1 [K]

P1 [Pa]

T3 [K]



Condiciones ambientales

Presión Atmosférica [Pa]

Temperatura Ambiente [K]

Botones auxiliares

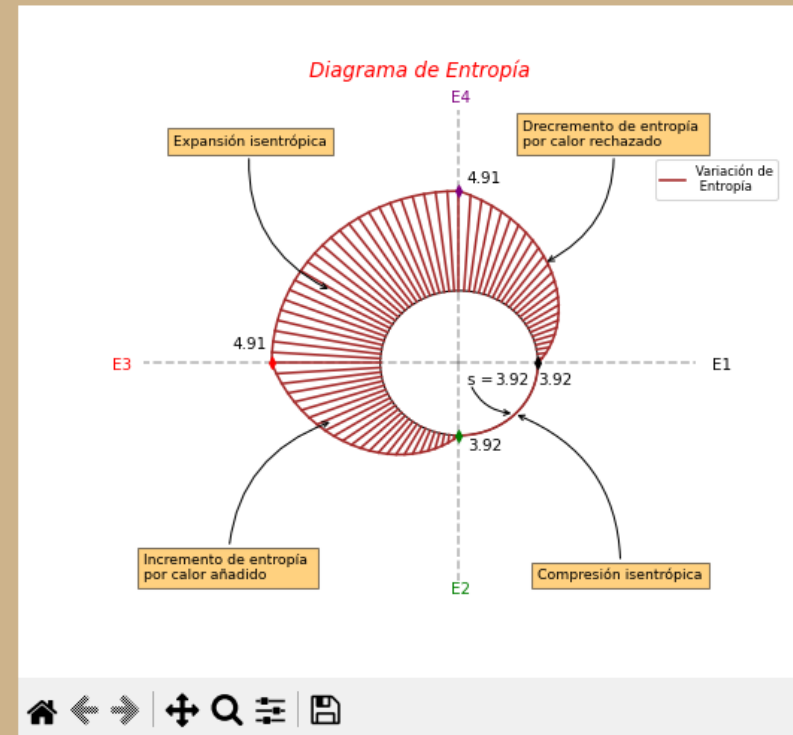
Métodos de cálculo

Método exacto

Método aproximado

Resultados en los 4 estados del ciclo

Variables	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Unidades
Temperatura (T)	299.0	756.66	2262.0	773.91	[K]
volumen (v)	0.97	0.09	0.09	2.51	[m³/kg]
Presión (P)	88.44	2484.68	7447.11	88.44	[kPa]
Entropía (s)	3.92	3.92	4.91	4.91	[kJ/kg.K]
Energía Interna (u)	339.52	682.49	2058.52	697.6	[kJ/kg]
Exergía (φ)	0.65	275.31	1359.19	186.04	[kJ/kg]



Método Usado
EXACTO

Resultados del ciclo

η	64.06	[%]	Δu12	342.97	[kJ/kg]
wneto	881.54	[kJ/kg]	Δu23	1376.03	[kJ/kg]
qa	1376.03	[kJ/kg]	Δu34	-1360.92	[kJ/kg]
qr	494.49	[kJ/kg]	Δu41	-358.08	[kJ/kg]

ANEXO III. Software ciclo de potencia Atkinson. Diagrama interactivo de exergía por el metodo exacto.

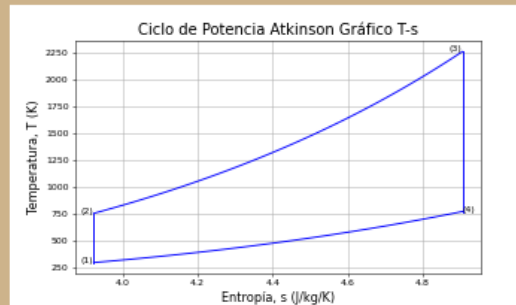
Datos de entrada

r relación de compresión

T1 [K]

P1 [Pa]

T3 [K]



Condiciones ambientales

Presión Atmosférica [Pa]

Temperatura Ambiente [K]

Métodos de cálculo

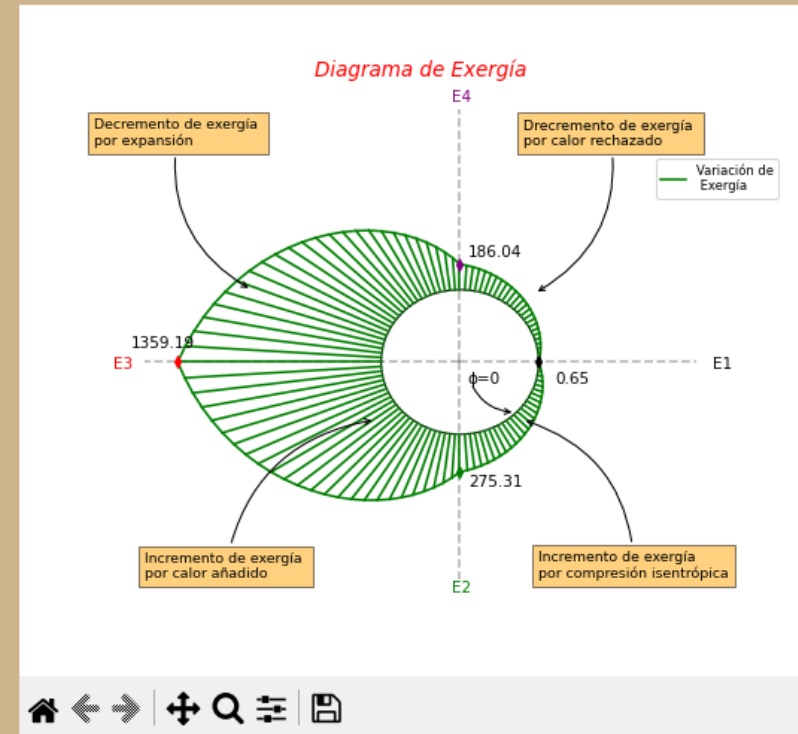
Método exacto

Método aproximado

Botones auxiliares

Resultados en los 4 estados del ciclo

Variables	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Unidades
Temperatura (T)	299.0	756.66	2262.0	773.91	[K]
volumen (v)	0.97	0.09	0.09	2.51	[m³/kg]
Presión (P)	88.44	2484.68	7447.11	88.44	[kPa]
Entropía (s)	3.92	3.92	4.91	4.91	[kJ/kg.K]
Energía Interna (u)	339.52	682.49	2058.52	697.6	[kJ/kg]
Exergía (φ)	0.65	275.31	1359.19	186.04	[kJ/kg]



Método Usado

EXACTO

Resultados del ciclo

η	64.06	[%]	Δu12	342.97	[kJ/kg]
wneto	881.54	[kJ/kg]	Δu23	1376.03	[kJ/kg]
qa	1376.03	[kJ/kg]	Δu34	-1360.92	[kJ/kg]
qr	494.49	[kJ/kg]	Δu41	-358.08	[kJ/kg]

ANEXO IV. Software ciclo de potencia Atkinson. Diagrama interactivo de energía por el metodo aproximado.

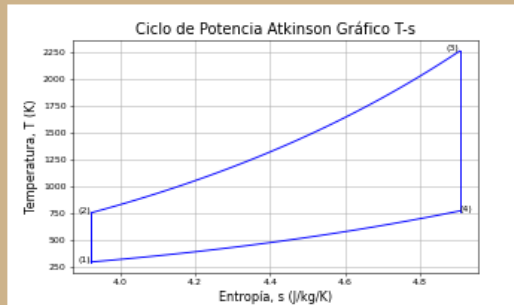
Datos de entrada

r relación de compresión

T1 [K]

P1 [Pa]

T3 [K]



Condiciones ambientales

Presión Atmosférica [Pa]

Temperatura Ambiente [K]

Métodos de cálculo

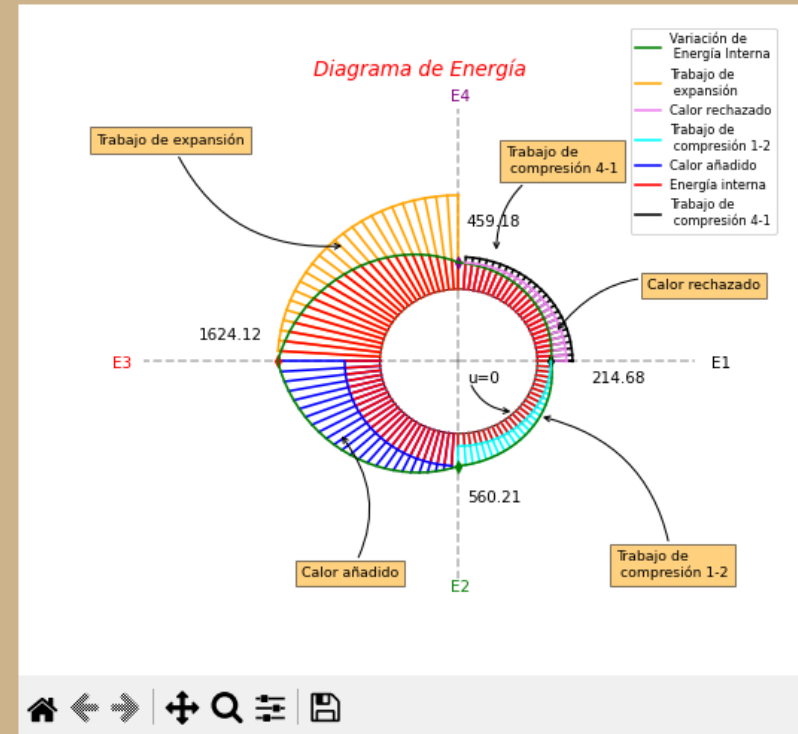
Método exacto

Método aproximado

Botones auxiliares

Resultados en los 4 estados del ciclo

Variables	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Unidades
Temperatura (T)	299.0	780.24	2262.0	639.53	[K]
volumen (v)	0.97	0.09	0.09	2.08	[m³/kg]
Presión (P)	88.44	2538.57	7359.58	88.44	[kPa]
Entropía (s)	-----	-----	-----	-----	[kJ/kg.K]
Energía Interna (u)	214.68	560.21	1624.12	459.18	[kJ/kg]
Exergía (φ)	-----	-----	-----	-----	[kJ/kg]



Método Usado
APROXIMADO

Resultados del ciclo

η	67.83	[%]	Δu12	345.53	[kJ/kg]
wneto	721.6	[kJ/kg]	Δu23	1063.9	[kJ/kg]
qa	1063.9	[kJ/kg]	Δu34	-1164.93	[kJ/kg]
qr	342.3	[kJ/kg]	Δu41	-244.5	[kJ/kg]

Anexo V. Manual de Usuario

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MANUAL DE USUARIO

DT-Atkinson

DANIEL ALEJANDRO HERNÁNDEZ VILLARREAL

daniel.hernandez@epn.edu.ec

MIGUEL DARÍO ORTEGA LÓPEZ

miguel.ortega@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2023

Manual de usuario

El software desarrollado DT-Atkinson, es una herramienta informática desarrollada para estudiar el comportamiento del ciclo de potencia Atkinson a través de un análisis numérico y también gráfico (energía, entropía, exergía), el fluido de trabajo usado para este ciclo es el aire como gas ideal. Toda la programación es desarrollada a través del lenguaje de programación Python

Ventana de inicio

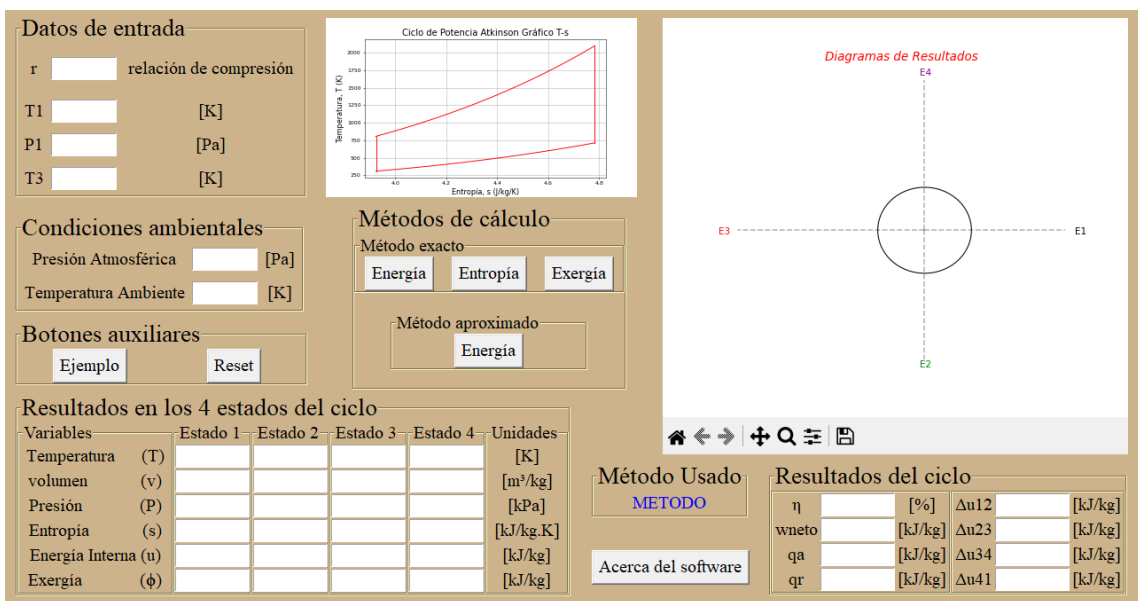


Figura 1. Venta principal del software.

En la **Figura 1** se muestra la interfaz gráfica desarrollada, en donde se visualizan las diferentes secciones, entre ellas tenemos datos de entrada, condiciones ambientales, botones auxiliares, métodos de cálculo (exacto, aproximado), resultados en los 4 estados del ciclo, grafica T-s, método de uso, resultados del ciclo y diagramas de resultados, a continuación, se describe cada sección y las consideraciones a tomar según corresponda.

Datos de entrada y condiciones ambientales

En la **Figura 2** se muestra la sección de datos de entrada y de condiciones ambientales, cabe señalar que las condiciones ambientales se las coloca en una sección diferente ya que esas intervienen exclusivamente para determinar la exergía del ciclo. Los datos de entrada de ingreso son 6, la relación de compresión (r), la temperatura en el estado 1 (T1), la temperatura

en el estado 3 (T3), la presión en el estado 1 (P1), la presión (Presión atmosférica) y la temperatura a condiciones ambiente, a continuación, se mencionan las unidades de ingreso de cada dato de entrada.

- ❖ r: no tiene unidades por ser solo una relación
- ❖ T1: [K]
- ❖ T3: [K]
- ❖ P1: [Pa]
- ❖ Pa: [Pa]
- ❖ Ta: [K]

Para los valores de entrada se deben tomar algunas consideraciones mencionadas a continuación.

- ❖ Ningún dato de entrada puede tener un valor de 0.
- ❖ Ningún dato puede tener valores negativos.
- ❖ La temperatura 3 siempre debe ser mayor a la temperatura 1

The image shows a software interface with two main sections: 'Datos de entrada' and 'Condiciones ambientales'. Each section contains several input fields with numerical values and their corresponding units.

Datos de entrada	
r	1.0 relación de compresión
T1	304 [K]
P1	69467 [Pa]
T3	1152 [K]

Condiciones ambientales	
Presión Atmosférica	87524.0 [Pa]
Temperatura Ambiente	305.0 [K]

Figura 2. Datos de entrada y condiciones ambientales.

Botones auxiliares

En la **Figura 3** se muestran los botones auxiliares con los que cuenta el software, el botón de reset y el de ejemplo.

El botón de reset como su nombre lo indica, sirve para eliminar todo el contenido antes calculado, vuelve a su estado base las gráficas, deja en blanco los datos en los cuadros de resultados y también en los datos de entrada.

El botón de ejemplo en cambio entrega datos aleatorios de entrada, pero estos valores se encuentran dentro de un rango, se mencionan a continuación:

- ❖ $8 \leq r \leq 13$
- ❖ $60000 \leq P1 \leq 100000$
- ❖ $60000 \leq Pa \leq 100000$
- ❖ $280 \leq T1 \leq 310$
- ❖ $280 \leq Ta \leq 310$
- ❖ $1000 \leq T3 \leq 3000$

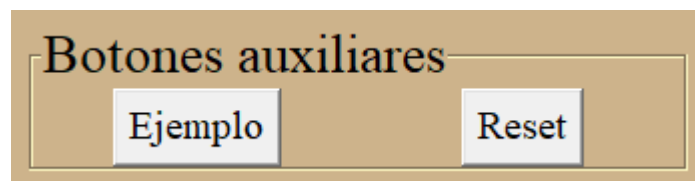


Figura 3. Botones auxiliares

Métodos de calculo

El software es capaz de determinar los resultados a través de 2 métodos, el método exacto y el método aproximado, en la **Figura 4** se observan los botones correspondientes a esta sección.

Para el método exacto existen 3 botones, los cuales al dar click entregan los mismos resultados en los cuadros de resultados, pero cambian sus gráficas, cada botón como su nombre lo indica entregan las gráficas de energía, entropía y exergía.

Para el método aproximado solo existe un botón, el cual entrega los resultados por el método aproximado y su grafica que corresponde a la energía. Para el método aproximado, no se ha modelado los diagramas de entropía y exergía por ser un proceso muy complejo.

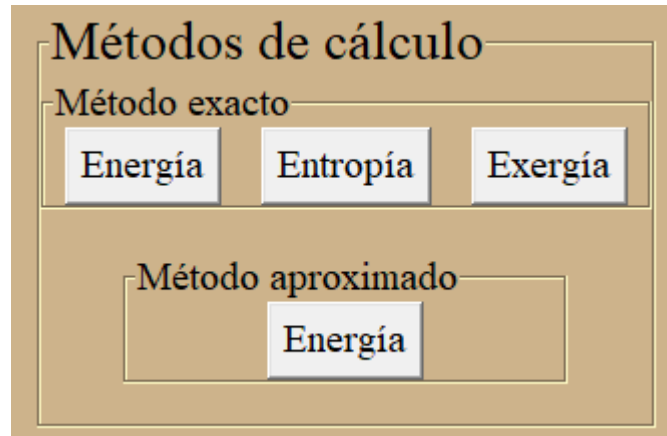


Figura 4. Métodos de cálculo

Método usado

En la **Figura 5** se muestra la sección en donde se muestra el método utilizado, esta sección sirve para identificar que método se utiliza, sucede en ocasiones que al pasar tiempo analizando la gráfica y datos, no se recuerda con que método se estaba realizando el análisis.

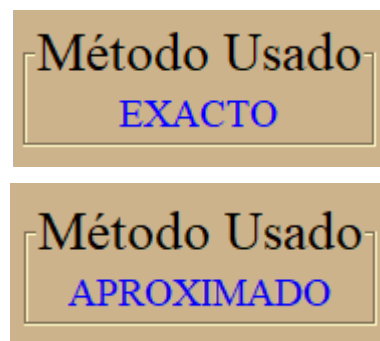


Figura 5 Método usado.

Resultados en los 4 estados del ciclo

En la **Figura 6** se muestra el cuadro de resultados para el método exacto y en la **Figura 7** para el método aproximado, como se menciona anteriormente no se calcula la entropía y exergía por el método aproximado, por ello los cuadros se muestran solo con líneas entre cortada. En este cuadro se pueden obtener los valores resultantes en los 4 estados del ciclo, a continuación, se muestra que propiedades se obtienen y en que unidades se encuentran.

- ❖ Temperatura (T) en [K]
- ❖ Volumen específico en (v) $\frac{m^3}{kg}$
- ❖ Presión (P) en [kPa]

- ❖ Entropía (s) en $\left[\frac{kJ}{kg.K}\right]$
- ❖ Energía interna (u) en $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
- ❖ Exergía (ϕ) en $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Resultados en los 4 estados del ciclo						
Variables		Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Unidades
Temperatura	(T)	304.0	304.0	1152.0	822.43	[K]
volumen	(v)	1.26	1.26	1.26	3.4	[m ³ /kg]
Presión	(P)	69.47	69.47	263.49	69.47	[kPa]
Entropía	(s)	4.01	4.01	5.04	5.04	[kJ/kg.K]
Energía Interna	(u)	343.15	343.15	1017.19	736.97	[kJ/kg]
Exergía	(ϕ)	2.45	2.45	361.23	268.59	[kJ/kg]

Figura 6. Cuadro de resultados método exacto.

Resultados en los 4 estados del ciclo						
Variables		Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Unidades
Temperatura	(T)	304.0	304.0	1152.0	787.31	[K]
volumen	(v)	1.26	1.26	1.26	3.25	[m ³ /kg]
Presión	(P)	69.47	69.47	263.24	69.47	[kPa]
Entropía	(s)	-----	-----	-----	-----	[kJ/kg.K]
Energía Interna	(u)	218.27	218.27	827.14	565.29	[kJ/kg]
Exergía	(ϕ)	-----	-----	-----	-----	[kJ/kg]

Figura 7. Cuadro de resultados método aproximado.

Resultados del ciclo

En la **Figura 8** se muestra el cuadro de resultados generales del ciclo, la eficiencia, el trabajo neto, y la variación de energía interna en cada proceso, a continuación, se muestra las unidades de cada resultado:

- ❖ Eficiencia (η) en [%]

- ❖ Trabajo neto (W_{neto}) en $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
- ❖ Calor añadido (q_a) en $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
- ❖ Calor añadido (q_r) en $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
- ❖ Variación de energía interna de 1-2 (Δu_{12}) en $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
- ❖ Variación de energía interna de 2-3 (Δu_{23}) en $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
- ❖ Variación de energía interna de 3-4 (Δu_{34}) en $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
- ❖ Variación de energía interna de 4-1 (Δu_{41}) en $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$

Resultados del ciclo					
η	19.49	[%]	Δu_{12}	0.0	[kJ/kg]
w_{neto}	131.34	[kJ/kg]	Δu_{23}	674.04	[kJ/kg]
q_a	674.04	[kJ/kg]	Δu_{34}	-280.23	[kJ/kg]
q_r	542.71	[kJ/kg]	Δu_{41}	-393.82	[kJ/kg]

Figura 8. Resultados del ciclo.

Diagrama T-s

En la **Figura 9** se muestra el gráfico T-s correspondiente, en este gráfico se muestra los valores de la temperatura en función de la entropía, en el eje de las x se encuentra el valor de las entropías y el eje de las y se encuentran los valores de temperatura. En este gráfico se muestran los valores de los 4 estados del ciclo.

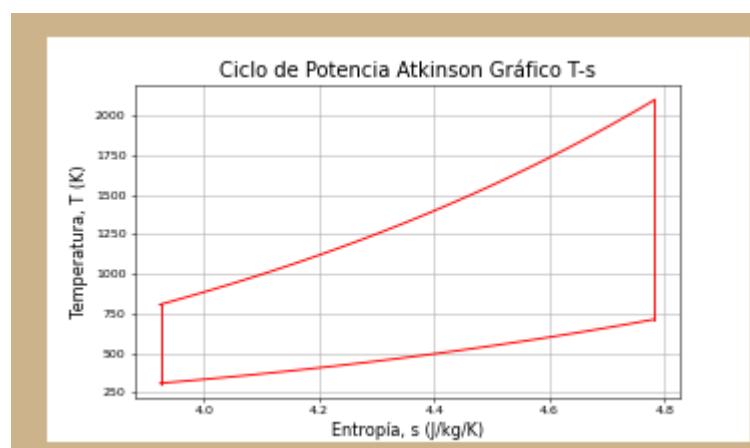


Figura 9. Diagrama T-s.

Diagramas interactivos

En este grafico se muestran los resultados del ciclo correspondientes a la variación de energía, entropía y exergía de todo el ciclo. Cada gráfico contiene etiquetas de color amarillo que muestra que ocurre en cada estado, en la parte superior derecha se muestra un cuadro que indica que significa cada color del gráfico, en la parte inferior se tiene una barra de herramientas para poder hacer más interactivo el entendimiento del gráfico. A continuación, se muestra el diagrama de energía por el método exacto **Figura 10** y método aproximado **Figura 11**, entropía **Figura 12**, exergía **Figura 13**.

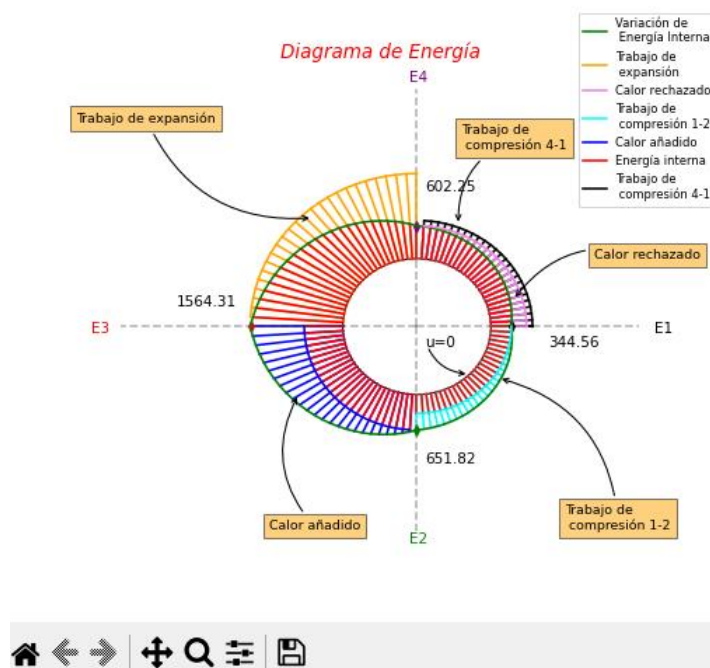


Figura 10. Diagrama interactivo de energía método exacto.

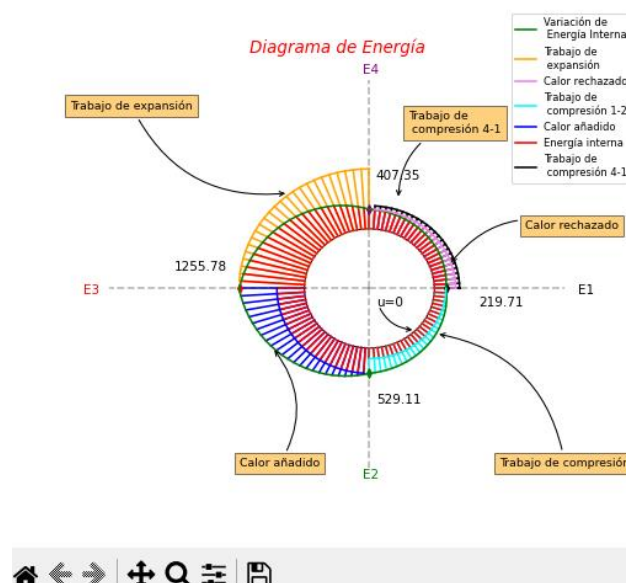


Figura 11. Diagrama interactivo de energía método aproximado.

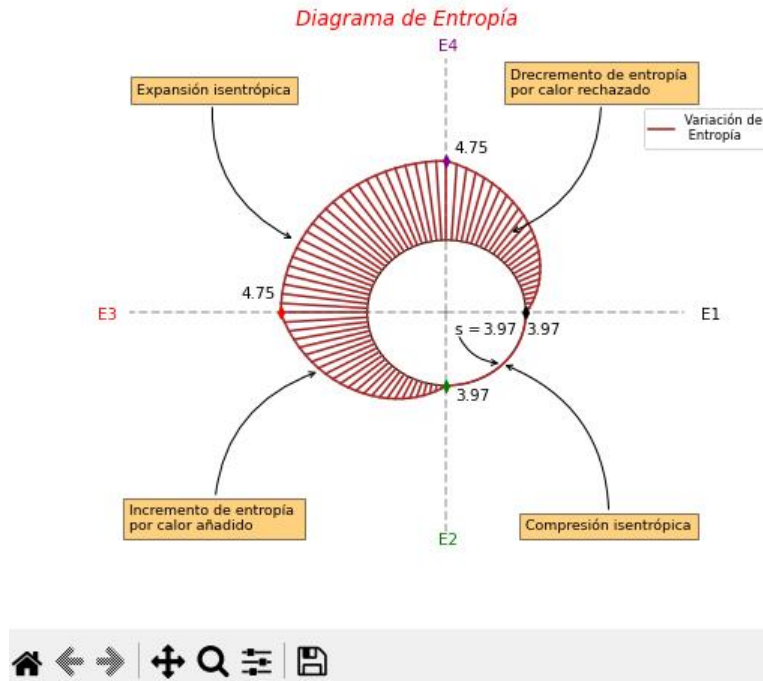


Figura 12. Diagrama interactivo de entropía.

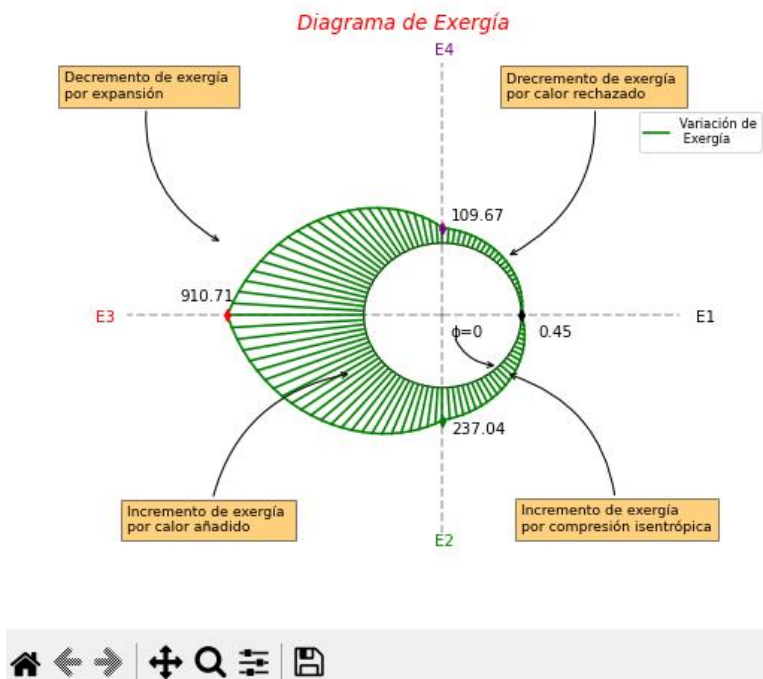


Figura 13. Diagrama interactivo de exergía.

Acerca del software

En la **Figura 14** se muestra el botón que lleva por nombre “acerca del software”, al dar click se muestra la información del desarrollador del software y del director de tesis **Figura 15**.

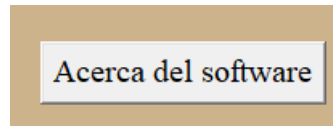


Figura 14. Botón acerca del software.



A screenshot of a web browser window titled 'Acerca del software'. The content is centered and includes the following information:

 **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL** 
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
**DIAGRAMAS TERMODINÁMICOS
INTERACTIVOS DEL CICLO ATKINSON**

Director de Tesis: Ing. Miguel Ortega. Msc
Correo electrónico: miguel.ortega@epn.edu.ec

Desarrollado por: Daniel Hernández
Correo electrónico: daniel.hernandez@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2023

Figura 15. Información proporcionada por el botón acerca del software.