INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA DE ENERGIA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA CÁLCULOS DE CICLOS DE POTÊNCIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE CENTRAIS TERMOELÉTRICAS.

CÉSAR DAVID BENITEZ

Foz do Iguaçu
2022

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO(ILATIT)

ENGENHARIA DE ENERGIA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA CÁLCULOS DE CICLOS DE POTÊNCIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE CENTRAIS TERMOELÉTRICAS.

CÉSAR DAVID BENITEZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dra. Andréia Cristina Furtado

Foz do Iguaçu
2022

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

CÉSAR DAVID BENITEZ

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DIDÁTICA PARA AUXILIAR NOS CÁLCULOS DE CICLOS DE POTÊNCIA PARA O DIMENSIONAMENTO DE CENTRAIS TERMOELÉTRICAS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

BANCA EXAMINADORA

_____

Orientador: Prof. Dra. Andréia Cristina Furtado
UNILA

_____

Prof. M.e Fabyo Luiz Pereira
UNILA

_____

Prof. M.e Itamar Pena Nieradka
IFPR

Foz do Iguaçu, 06 de dezembro de 2022.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

RESUMO

Diversos sistemas e máquinas, sejam de uso cotidiano ou industrial, baseiam seu funcionamento em um ciclo de potência, daí a importância de estudar esses ciclos dentro da termodinâmica. A geração de energia por meio de usinas termelétricas, por exemplo, é uma das aplicações mais difundidas desse ramo da termodinâmica, pois operam por meio de ciclos de potência como Brayton e/ou Rankine, em sua maioria. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um programa de computador que sirva como ferramenta didática para auxiliar no cálculo de ciclos de potência para o dimensionamento de usinas termelétricas. Pretende-se que a aplicação tenha uma interface gráfica simples e intuitiva que facilite a sua utilização. Foi desenvolvido na linguagem de programação Python e utilizando as bibliotecas Tkinter e CoolProp, entre outras. O programa criado foi validado através da comparação de resultados com o software comercial Engineering Equation Solver. Nesta comparação, observou-se que o aplicativo criado oferece alta precisão nos resultados e, portanto, pode ser utilizado com confiança.

Palavras-chave: ciclos de potência, usinas termelétricas, Python, ciclo Rankine, ciclo Brayton.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

ABSTRACT

Several systems and machines, whether in everyday or industrial use, base their operation on a power cycle, hence the importance of studying these cycles within thermodynamics. The generation of energy through thermoelectric plants, for example, is one of the most widespread applications of this branch of thermodynamics, as they operate through power cycles such as Brayton and/or Rankine, for the most part. This work aims to develop a computer program that serves as a didactic tool to assist in the calculation of power cycles for the design of thermoelectric plants. It is intended that the application has a simple and intuitive graphical interface that facilitates its use. It was developed in the Python programming language and using the Tkinter and CoolProp libraries, among others. The created program was validated by comparing results with the commercial software Engineering Equation Solver. In this comparison, it was observed that the created application offers high accuracy in the results and, therefore, can be used with confidence.

Keywords: power cycles, thermoelectric plants, Python, Rankine cycle, Brayton cycle.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 8

1.1. OBJETIVOS 10

1.1.1. Geral 10

1.1.2. Específicos 10

2. FUNDAMENTOS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA 12

2.1. DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS 12

2.2. TIPOS DE GERAÇÃO TERMELÉTRICA 13

2.2.1. Geração Por Turbinas A Gás 13

2.2.2. Geração Por Unidades De Vapor 14

2.2.3. Geração Por Unidades De Ciclo Combinado 15

3. CICLOS DE POTÊNCIA PARA CENTRAIS TÉRMICAS 16

3.1. SISTEMAS DE POTÊNCIA A GÁS 16

3.1.1. Ciclo Brayton Simples 16

3.1.2. Ciclo Brayton Simples Com Irreversibilidades 18

3.2. CICLOS DE POTÊNCIA A VAPOR 20

3.2.1. Ciclo Rankine Ideal 20

3.2.2. Ciclo Rankine Com Irreversibilidades 22

3.2.3. Ciclo Rankine Ideal com Reaquecimento 23

3.2.4. Ciclo Rankine Ideal Regenerativo 24

3.3. CICLOS COMBINADOS GÁS-VAPOR 26

4. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA 28

4.1. POTÊNCIA NETA 28

4.2. DESEMPENHO GLOBAL 28

4.3. HEAT RATE (HR) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

4.4. STEAM RATE (SR) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

4.5. CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL (CEC) 30

4.6. OUTROS PARÂMETROS 30

5. METODOLOGIA 31

5.1. CÓDIGO 31

5.1.1. Python 31

5.1.2. CoolProp 32

5.1.3. Tkinter 32

5.2. ALGORITMO GERAL 33

6. RESULTADOS E ANÁLISE 34

6.1. INTERFACE 34

6.2. FUNCIONAMENTO 40

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

7. CONCLUSÕES 44

REFERÊNCIAS 45

APENDICES 46

APÊNDICE A – DADOS E RESULTADOS PARA O CASO DO CICLO COMBINADO COM REGENERAÇÃO. 47

APÊNDICE B – ESQUEMAS UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA. 48

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

1. INTRODUÇÃO

As usinas termelétricas são uma das tecnologias de geração elétrica que mais evoluíram no século anterior e atual e fazem parte da matriz energética de quase todos os países do mundo. Pode-se dizer que isso se deve principalmente às vantagens que essas plantas apresentam; como a variedade de combustíveis com que podem operar, a rapidez de sua construção, as altas eficiências que podem ser alcançadas em determinadas configurações, como o ciclo combinado, e os relativamente moderados custos de investimento que podem implicar. Eles também são eficazes em resposta a possíveis previsões errôneas de demanda de eletricidade.

No entanto, é um tipo de geração de eletricidade poluente. Em geral, as usinas termelétricas que utilizam combustíveis derivados do petróleo são caracterizadas pela predominância de emissões de CO_x na atmosfera, poluição térmica e sonora.

Embora os avanços tecnológicos e o crescente uso do gás natural como combustível tenham ajudado a reduzir as emissões causadas por esse tipo de usina, não foram suficientes para responder aos questionamentos, do ponto de vista das emissões, que essas usinas recebem.

Tudo isso, somado ao grande boom que a produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis experimentou nos últimos anos, à evolução da estrutura do setor elétrico mundial e iniciativas como a Agenda 2030 e/ou legislação governamental no pós de uma transição energética em direção a fontes de geração menos poluentes fez com que as termelétricas ficassem em segundo plano, com várias delas até sendo desativadas em vários países.

No entanto, em muitas regiões ainda são utilizadas, seja como fonte principal de atendimento da demanda, como back-up ou como centrais de regulação que servem como cobertura de picos de demanda de energia elétrica.

O processo de geração de energia em usinas termelétricas consiste, em linhas gerais, no aproveitamento da energia térmica liberada na forma de calor, normalmente por meio da queima de combustíveis fósseis em uma câmara

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

projetada para esse fim. Este calor é utilizado por um ciclo termodinâmico convencional para movimentar uma turbina acoplada a um gerador e assim produzir energia elétrica. Os ciclos termodinâmicos mais utilizados como ciclos de potência em usinas termelétricas são os ciclos Brayton e Rankine, geralmente combinados.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta didática para auxiliar nos cálculos de ciclos de potência para o dimensionamento de usinas termelétricas, buscando facilitar os cálculos tediosos, minuciosos e longos que podem ser realizados em um trabalho de dimensionamento, levando em consideração que trabalhar com propriedades como entalpias e entropias significa ter que recorrer tabelas de propriedades termodinâmicas que, por sua vez, muitas vezes envolvem etapas extras como interpolação de valores, entre outras questões.

A referida ferramenta consistirá em uma aplicação desktop (para computadores) que será desenvolvida inteiramente na linguagem de programação Python, utilizando alguns módulos próprios da linguagem, além de bibliotecas externas, porém compatíveis com Python.

Ressalta-se que este aplicativo será desenvolvido para fins puramente educacionais, portanto, não terá a complexidade técnica, quantidade de funções e ferramentas que softwares profissionais e comerciais da área ou similares poderiam ter. No entanto, procurar-se-á que tenha uma interface simples e amigável, para que o usuário apenas tenha que introduzir os dados de entrada necessários, facilitando ao máximo a sua manipulação.

Em relação à parte escrita deste trabalho; primeiramente, será realizada uma revisão do estado da arte. A seção 2 definirá o que é uma usina termelétrica e os tipos de geração de eletricidade que serão abordados neste trabalho.

Na seção 3, serão conceituadas e apresentadas as equações dos ciclos de potência que serão utilizadas no programa, cabendo destacar que serão considerados apenas alguns dos ciclos mais comuns (e suas respectivas variações e configurações) em instalações termelétricas. Isso não significa que sejam os únicos ciclos existentes para geração de energia nem os únicos utilizados na prática. Deve-se mencionar também que a revisão bibliográfica que será

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

apresentada é uma revisão muito breve, ignorando muitos conceitos que serão tidos como garantidos, uma vez que são em sua maioria conceitos termodinâmicos que são amplamente desenvolvidos e divulgados, destacando que o foco principal do trabalho será o aplicativo a ser desenvolvido, o produto final, por assim dizer.

A quarta seção explicará os principais parâmetros de desempenho utilizados no campo técnico/profissional para avaliar projetos de instalação de usinas termelétricas. O aplicativo também realizará o cálculo desses parâmetros.

Já na seção número 5, será apresentada a metodologia utilizada, assim como a linguagem de programação, módulos, bibliotecas e o algoritmo geral da ferramenta computacional.

Por fim, na seção 6 será analisado o grau de precisão da ferramenta, para isso serão feitos cálculos com o aplicativo desenvolvido e os resultados serão comparados com os resultados obtidos, resolvendo o mesmo problema, com o software Engineering Equation Solver (EES), um produto comercial muito poderoso e preciso para cálculos termodinâmicos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Geral

- Desenvolver uma ferramenta didática para auxiliar nos cálculos de ciclos de potência para o dimensionamento de usinas termelétricas.

1.1.2. Específicos

- Fornecer ao programa uma interface gráfica simples que facilite seu uso.
- Desenvolver sub-rotinas em Python para cada ciclo termodinâmico, aplicando o modelo matemático correspondente para cada um.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

- Lograr a fusão das sub-rotinas com a interface para que sejam compatíveis e se comuniquem entre si.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

2. FUNDAMENTOS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA

2.1. DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS

As centrais termelétricas são instalações que transformam energia térmica em energia elétrica por meio de uma série de transformações de energia. A energia térmica obtida é transferida para um fluido de trabalho (água, ar, fluido orgânico, etc.) que é utilizado para produzir energia mecânica em um dispositivo adequado, normalmente uma turbina. O eixo da turbina é acoplado a um gerador elétrico e através deste é realizada a transformação da energia mecânica em energia elétrica (GONZÁLEZ, 2017).

A energia térmica pode ser obtida de diferentes formas, e isso dá o nome a cada usina, nas Centrais Térmicas Convencionais, por exemplo, o calor é obtido pela liberação da energia química contida em um combustível fóssil (gás natural, carvão, óleo combustível, diesel) através do processo de combustão. Essas plantas são divididas em: Turbo Vapor (TV), Turbo Gás (TG), Ciclo Combinado (CC, combinação de TV e TG) e Diesel (D) (GONZÁLEZ, 2017).

Outro tipo de usina em que o processo de combustão é utilizado para liberar a energia química contida em um combustível são as Centrais Termelétricas a Biomassa. Neste caso, como o próprio nome indica, a biomassa (resíduos agroflorestais, resíduos sólidos urbanos, biocombustíveis) é utilizada como combustível para a obtenção de calor.

Já no caso das Centrais Termonucleares, o processo utilizado para obtenção de calor é o de fissão nuclear, por meio do qual a energia nuclear é liberada a partir de determinados materiais radioativos como o U235 ou o plutônio (GONZÁLEZ, 2017).

Por sua vez, em uma Usina Térmica Solar, o calor é obtido pela captação direta da energia solar e concentrando-a por meio de espelhos, em uma linha ou em um ponto focal por onde circula o fluido de trabalho (GONZÁLEZ, 2017).

Também podemos encontrar Usinas Geotérmicas, neste caso, o calor é obtido a partir da energia geotérmica no interior da Terra.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

E por fim, podemos também distinguir as Centrais de Cogeração. A cogeração é o procedimento pelo qual a energia elétrica e a energia térmica útil (vapor, água quente sanitária, etc.) são obtidas simultaneamente a partir de um único recurso energético (fóssil, biomassa, etc.) (GONZÁLEZ, 2017).

2.2. TIPOS DE GERAÇÃO TERMELÉTRICA

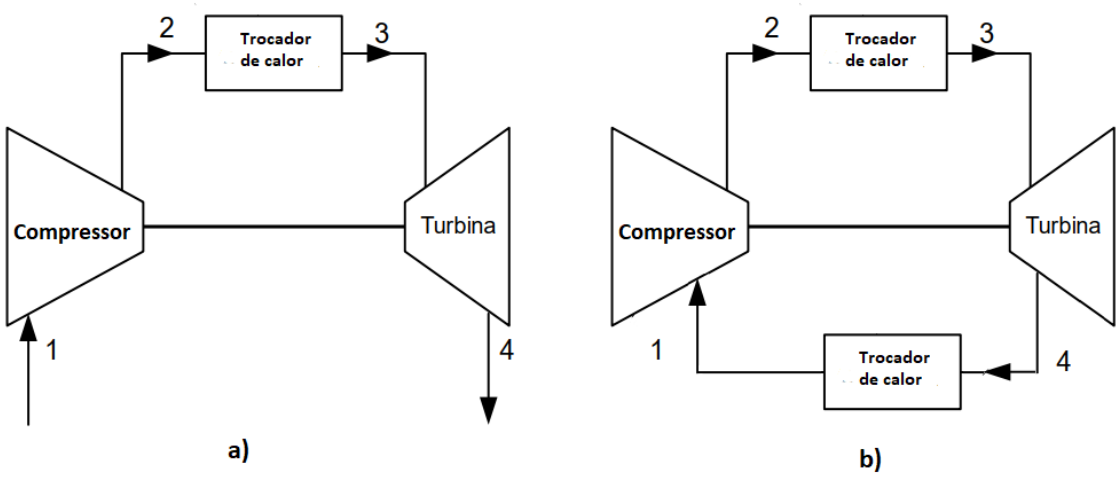
2.2.1. Geração Por Turbinas A Gás

No processo de geração através de turbinas a gás, a energia é obtida a partir do calor fornecido pelos gases produzidos pela combustão de diferentes tipos de combustíveis em uma câmara especial. O modelo termodinâmico que rege esse processo é baseado no ciclo de Brayton.

Os ciclos de turbinas a gás são classificados em ciclos abertos e fechados, dependendo se os gases da turbina são evacuados diretamente para a atmosfera, como é o caso do ciclo Brayton não regenerativo, ou são recirculados passando-os para o compressor através de um trocador de calor para recuperar parte do calor, neste caso é um ciclo regenerativo (BORJA, 2009).

A Figura 1 mostra o processo de geração termelétrica por meio de unidades de gás de circuito aberto (a) e fechado (b).

Figura 1 - Arranjo de sistemas com turbina a gás de ciclo a) aberto e b) fechado.



Fonte: o autor.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

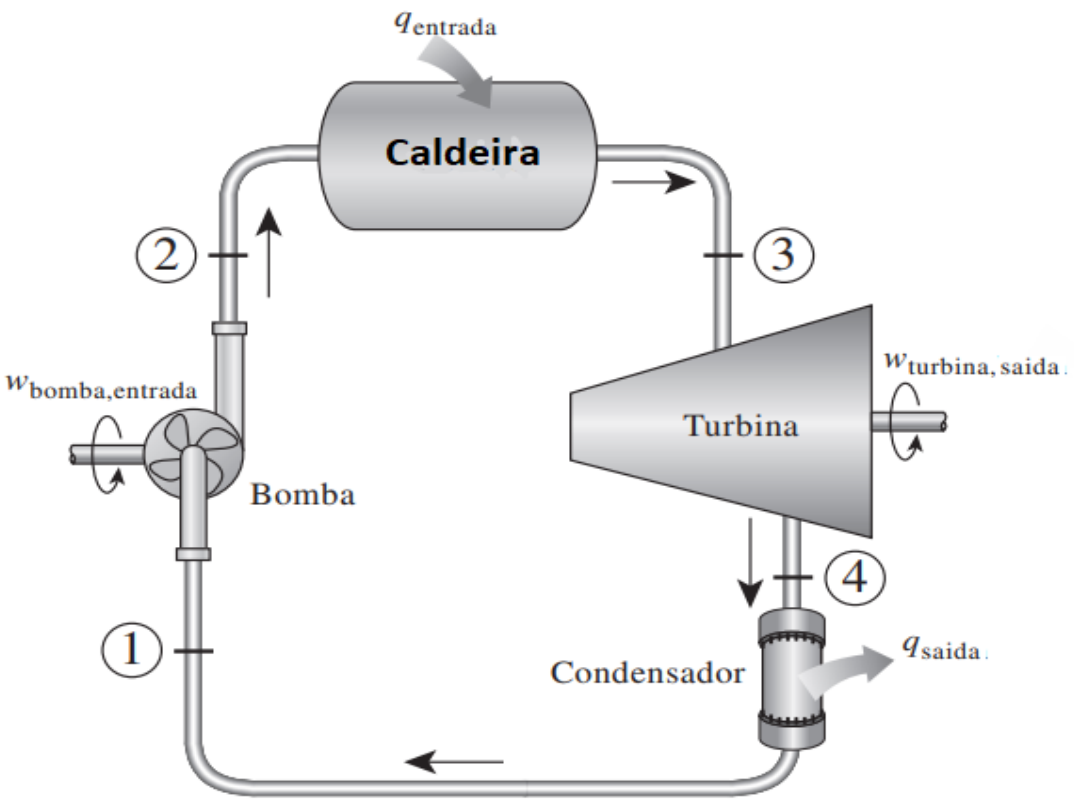
2.2.2. Geração Por Unidades De Vapor

O princípio geral de funcionamento deste tipo de usina é baseado no ciclo termodinâmico Rankine, através do qual a energia térmica liberada pelo vapor d'água produzido em um gerador de vapor a uma determinada temperatura e pressão é utilizada para movimentar uma turbina e gerar energia elétrica (BORJA, 2009).

Independentemente do combustível usado, o esquema operacional de uma usina a vapor é o mesmo. As únicas diferenças consistem no pré-tratamento dado ao combustível antes de ser injetado na caldeira e no desenho dos seus queimadores, que variam de acordo com o tipo de combustível utilizado (BORJA, 2009).

Na Figura 2 podemos ver o esquema de uma usina a vapor que funciona com um ciclo Rankine simples.

Figura 2 - Componentes do ciclo Rankine simples.



Fonte: adaptado de Çengel, Boles, 2012.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

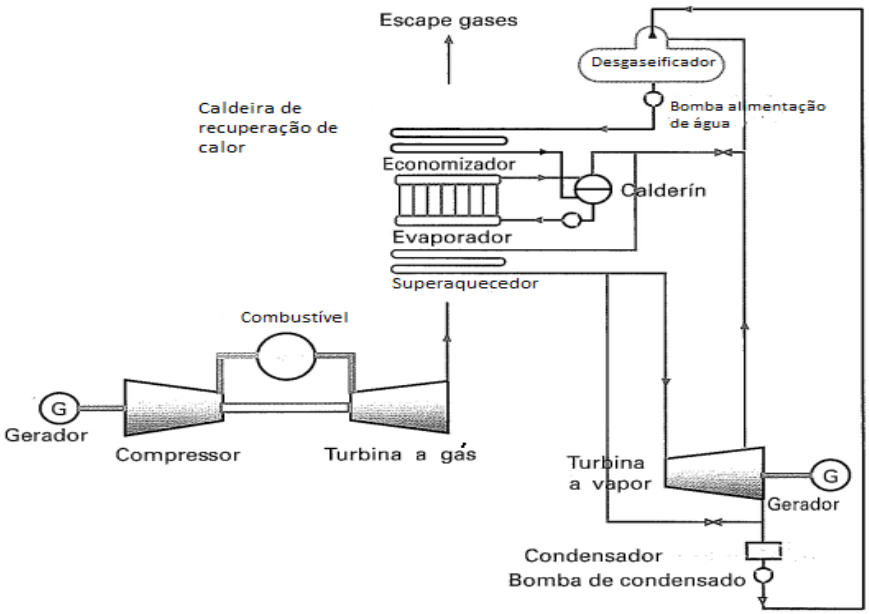
2.2.3. Geração Por Unidades De Ciclo Combinado

Para aproveitar ao máximo o excesso de calor contido nos gases de exaustão das turbinas de combustão e em busca de aumentar a eficiência, são projetadas usinas de ciclo combinado.

Um ciclo combinado pode ser definido como o acoplamento de dois ciclos termodinâmicos individuais, um que opera em altas temperaturas e outro com temperaturas de trabalho mais baixas. O calor residual do ciclo de alta temperatura é utilizado principalmente em um trocador de calor para produzir trabalho em um ciclo termodinâmico de baixa temperatura (SABUGAL; GÓMEZ, 2006). A figura 3 mostra um diagrama com os principais elementos constituintes de um ciclo combinado gás-vapor em sua configuração mais básica.

A justificativa para os ciclos combinados reside no fato de que, do ponto de vista tecnológico, é difícil alcançar um único ciclo termodinâmico que funcione entre as temperaturas médias das fontes quentes e frias usuais. Por isso é utilizado o acoplamento de dois ciclos, um especializado na produção de trabalho com alta eficiência em altas faixas de temperaturas de trabalho (Brayton) e outro para temperaturas médias-baixas como o ciclo Rankine (SABUGAL; GÓMEZ, 2006).

Figura 3 - Ciclo combinado básico. Principais elementos constituintes.



Fonte: Sabugal; Gómez, 2006.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

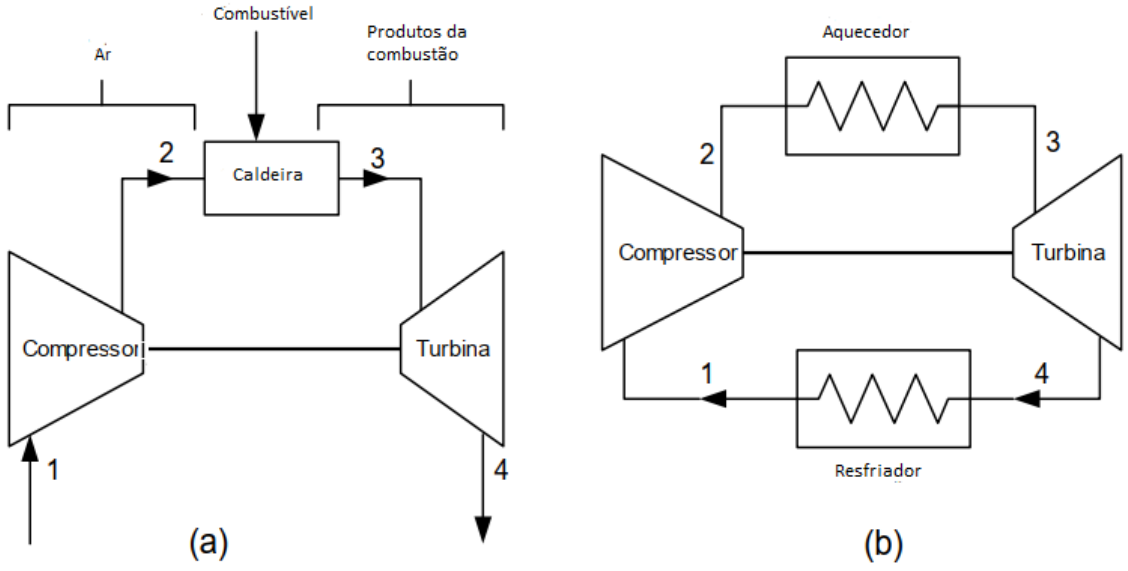
3. CICLOS DE POTÊNCIA PARA CENTRAIS TÉRMICAS

3.1. SISTEMAS DE POTÊNCIA A GÁS

3.1.1. Ciclo Brayton Simples

Turbinas a gás operam em ciclo aberto conforme mostrado na figura 4(a). O ar entra no compressor em condições ambientais, onde sua pressão e temperatura aumentam, depois passa para a câmara de combustão, onde ocorre a ignição ou queima do combustível a pressão constante, elevando a temperatura dos gases produzidos pela combustão, que então alimentam a turbina onde se expandem produzindo trabalho. Por fim, esses gases saem da máquina e escapam para a atmosfera (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Figura 4 - Arranjos de sistemas de turbinas a gás: (a) ciclo aberto e (b) circuito fechado.



Fonte: adaptado de Borja, 2009.

Este ciclo aberto de turbina a gás também pode ser modelado como um ciclo fechado, conforme indicado na figura 4(b), usando as suposições de ar padrão.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

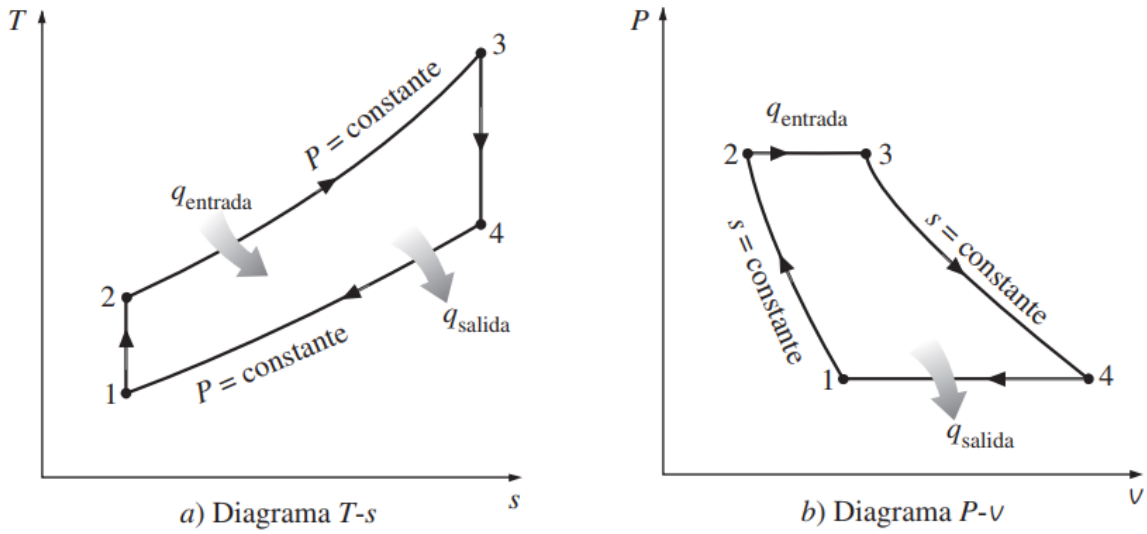
O ciclo ideal para uma turbina a gás como sistema fechado é o ciclo padrão de Brayton. Neste caso os processos de compressão e expansão permanecem os mesmos, mas o processo de combustão é substituído por um processo de adição de calor a pressão constante de uma fonte externa e o processo de exaustão é substituído por um processo de rejeição de calor a pressão constante para o ar ambiente (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Consiste em quatro processos internamente reversíveis:

- 1 - 2 Compressão isentrópica (em um compressor).
- 2 - 3 Adição de calor a pressão constante.
- 3 - 4 Expansão isentrópica (em uma turbina).
- 4 - 1 Rejeição de calor a pressão constante.

Os diagramas T-s e P-v de um ciclo Brayton ideal são mostrados na figura 5. Deve-se notar que todos os quatro processos do ciclo Brayton são executados em dispositivos de fluxo estacionário.

Figura 5 - Diagramas T-s e P-v para um ciclo de Brayton ideal.



Fonte: Çengel, Boles, 2012.

A eficiência de um ciclo Brayton ideal depende da relação de pressão da turbina a gás "r_p" e da relação de calor específico do fluido de trabalho "k" de acordo com a seguinte expressão (ÇENGEL, BOLES, 2012):

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

$$\eta_{tér.Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \qquad (1)$$

Observa-se que a eficiência aumenta com a relação de pressão, o que também é verdade para turbinas a gás reais.

A temperatura mais alta em um ciclo Brayton ocorre no final do processo de combustão (estado 3) e é limitada pela temperatura máxima que alguns elementos de construção, como as pás da turbina, podem suportar. Isso também limita a relação de pressão do ciclo (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Para uma temperatura de entrada da turbina fixa, a saída de trabalho líquido do ciclo aumenta com a razão de pressão, atinge um máximo e então começa a diminuir. Consequentemente, deve haver um compromisso entre a razão de pressão e a saída de trabalho líquido. Em muitos projetos comuns, a relação de pressão varia de 11 a 16 (ÇENGEL, BOLES, 2012).

3.1.2. Ciclo Brayton Simples Com Irreversibilidades

Na prática, várias razões podem ser atribuídas ao porque os ciclos reais de turbinas a gás diferem do ciclo ideal de Brayton. Por exemplo, alguma queda de pressão é inevitável durante os processos de adição e rejeição de calor. Outra questão muito importante é que o trabalho real de entrada para o compressor será maior e o trabalho real de saída da turbina será menor devido a irreversibilidades (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Este desvio do comportamento real do compressor e da turbina do comportamento isentrópico idealizado pode ser levado em conta com precisão se forem utilizadas as eficiências isentrópicas da turbina e do compressor, definidas como (ÇENGEL, BOLES, 2012):

$$\eta_C = \frac{w_s}{w_a} \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \qquad (2)$$

e

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} \cong \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \qquad (3)$$

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Onde

η_C e η_T são as eficiências do compressor e da turbina respetivamente

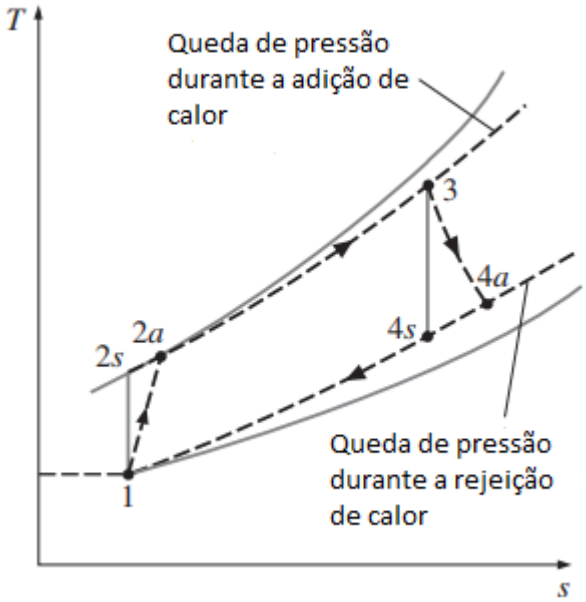
w_a = trabalho real

w_s = trabalho isentrópico

h_i = entalpia no estado i

Os estados *2a* e *4a* são os estados reais de saída do compressor e da turbina, respectivamente, e *2s* e *4s* são aqueles correspondentes ao caso isentrópico. A figura 6 mostra o diagrama T-s do ciclo com as irreversibilidades do processo.

Figura 6 - Desvio de um ciclo de turbina a gás real do ciclo ideal de Brayton como resultado de irreversibilidades.



Fonte: adaptado de Çengel, Boles, 2012.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

3.2. CICLOS DE POTÊNCIA A VAPOR

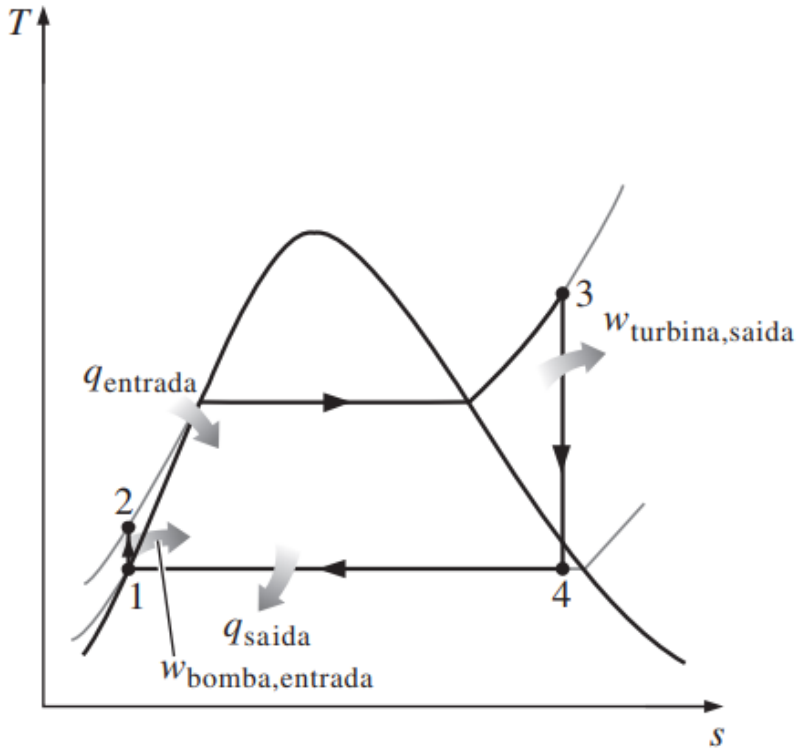
3.2.1. Ciclo Rankine Ideal

O ciclo ideal para usinas a vapor é o ciclo Rankine. O ciclo Rankine ideal não inclui nenhuma irreversibilidade interna e é composto pelos quatro processos a seguir (ÇENGEL, BOLES, 2012):

- 1-2 Compressão isentrópica em uma bomba
- 2-3 Adição de Calor de Pressão Constante em uma Caldeira
- 3-4 Expansão isentrópica em uma turbina
- 4-1 Rejeição de Calor de Pressão Constante em um Condensador

A figura 7 mostra o diagrama T-s do ciclo. A água entra na bomba no estado 1 como um líquido saturado e é condensada isentropicamente à pressão de operação da caldeira, aumentando ligeiramente sua temperatura durante este processo de compressão isentrópico (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Figura 7 - O ciclo ideal simples de Rankine.



Fonte: adaptado de Çengel, Boles, 2012.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

A água então entra na caldeira como um líquido comprimido no estado 2 e sai como vapor superaquecido no estado 3. Esse vapor superaquecido entra na turbina, onde se expande isentropicamente, produzindo trabalho. A pressão e a temperatura do vapor diminuem durante este processo para os valores no estado 4, onde o vapor entra no condensador, lá é condensado a pressão constante. O vapor sai do condensador como líquido saturado e entra na bomba, completando o ciclo (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Todos os quatro componentes associados ao ciclo Rankine são dispositivos de fluxo estacionário, de modo que os quatro processos que compõem o ciclo Rankine podem ser analisados como processos de fluxo estacionário.

A caldeira e o condensador não incluem nenhum trabalho e a bomba e a turbina são consideradas isentrópicas, então a relação de conservação de energia para cada dispositivo pode ser expressa como (ÇENGEL, BOLES, 2012):

- Para a bomba

$$w_{bomba.entrada} = h_2 - h_1 \qquad (4)$$

- Para a caldeira

$$q_{entrada} = h_3 - h_2 \qquad (5)$$

- Na turbina

$$w_{turbina.saida} = h_3 - h_4 \qquad (6)$$

- No condensador

$$q_{saida} = h_4 - h_1 \qquad (7)$$

e a eficiência térmica do ciclo Rankine é determinada a partir de:

$$\eta_{tér} = \frac{w_{líquido}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{saida}}{q_{entrada}} \qquad (8)$$

Onde

$$w_{líquido} = q_{entrada} - q_{saida} = w_{turbina.saida} - w_{bomba.entrada} \qquad (9)$$

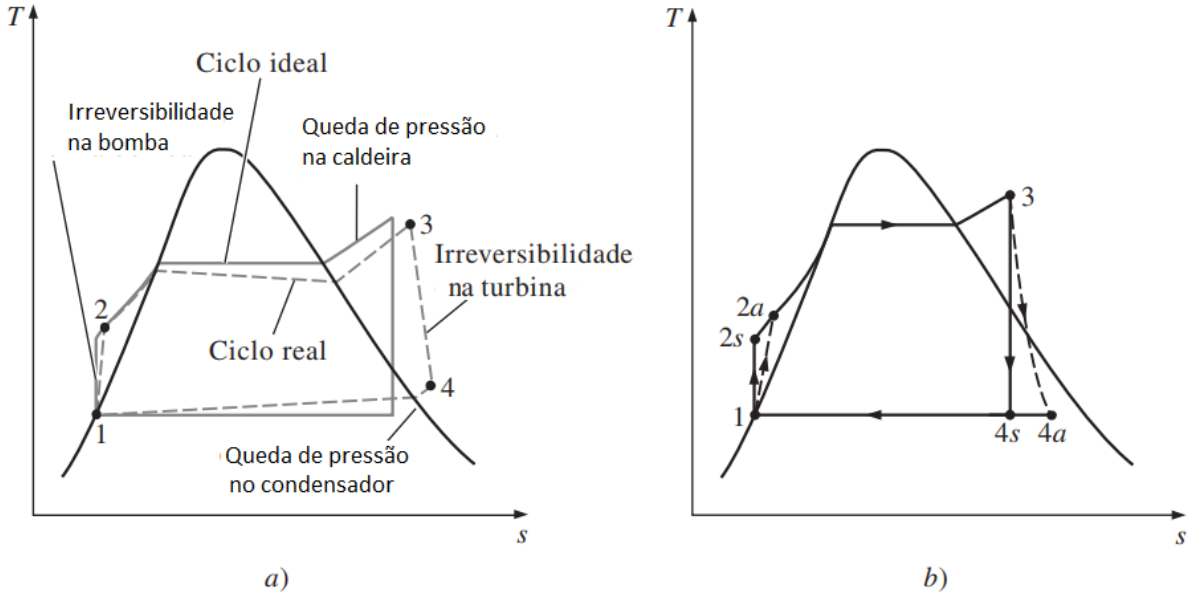
Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

3.2.2. Ciclo Rankine Com Irreversibilidades

O ciclo de potência a vapor real difere do ciclo Rankine ideal como resultado de irreversibilidades em vários componentes, como indicado na figura 8. O atrito do fluido e as perdas de calor para o ambiente são as duas fontes mais comuns de irreversibilidades.

O atrito do fluido causa quedas de pressão na caldeira, condensador e tubulação. Isso faz com que o vapor saia da caldeira a uma pressão ligeiramente mais baixa. Além disso, a pressão na entrada da turbina é ligeiramente menor do que na saída da caldeira, devido à queda de pressão nos tubos de conexão. A queda de pressão através do condensador é geralmente muito pequena (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Figura 8 - a) Desvio do ciclo de potência a vapor real do ciclo de Rankine ideal. b) Efeito das irreversibilidades da bomba e da turbina no ciclo Rankine ideal.



Fonte: adaptado de Çengel, Boles, 2012.

O desvio entre bombas e turbinas reais em relação às isentrópicas pode ser levado em consideração usando eficiências isentrópicas, definidas como:

$$\eta_B = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \qquad (10)$$

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (11)$$

Onde os estados *2a* e *4a* são os estados reais de saída da bomba e da turbina, respectivamente, enquanto *2s* e *4s* são os estados correspondentes para o caso isentrópico.

3.2.3. Ciclo Rankine Ideal com Reaquecimento

Uma das alternativas que se propõem, na busca de melhorar a eficiência térmica do ciclo Rankine, é aumentar a pressão da caldeira, mas isso reduz o título na saída da turbina a níveis inaceitáveis.

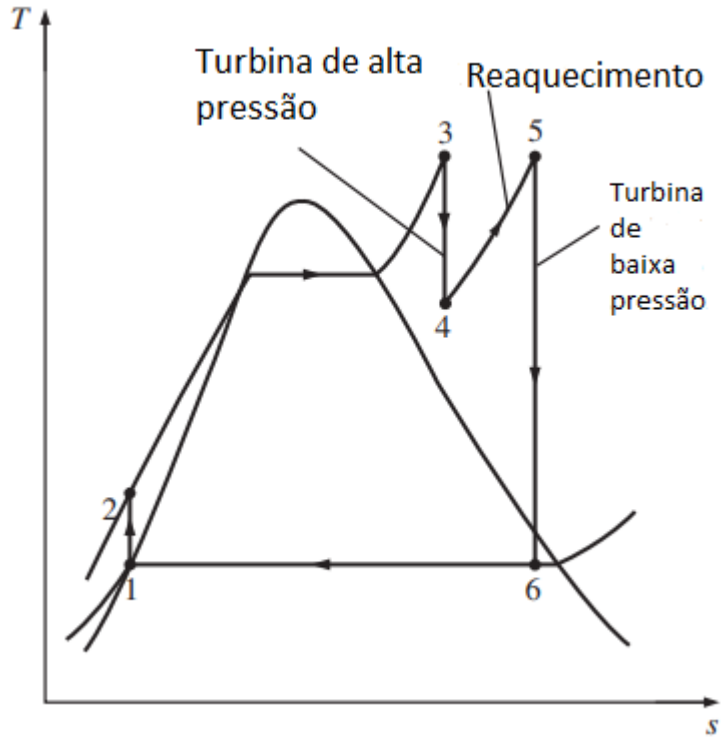
Uma solução prática proposta para este problema de título baixo em turbinas consiste em modificar o ciclo de Rankine ideal simples com um processo de reaquecimento. Ou seja, expandir o vapor na turbina em duas etapas e reaquecer entre elas (ÇENGEL, BOLES, 2012).

O ciclo de Rankine ideal com reaquecimento difere do ciclo de Rankine ideal simples, uma vez que o processo de expansão ocorre em duas etapas. O diagrama T-s pode ser visto na figura 9.

Na primeira turbina, de alta pressão, o vapor se expande isentropicamente até uma pressão intermediária e retorna à caldeira onde é reaquecido a pressão constante, geralmente até a temperatura de entrada da turbina do primeiro estágio. Em seguida, o vapor se expande isentropicamente no segundo estágio, denominado de baixa pressão, até a pressão do condensador (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Figura 9 - O ciclo Rankine ideal com reaquecimento.



Fonte: Çengel, Boles, 2012.

Assim, a entrada total de calor e a saída total de trabalho da turbina em um ciclo de reaquecimento se tornam:

$$q_{entrada} = q_{primario} + q_{\text{reaquecimento}} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \qquad (12)$$

$$w_{turbina.saída} = w_{turbina\ I} + w_{\text{turbina II}} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \qquad (13)$$

3.2.4. Ciclo Rankine Ideal Regenerativo

A regeneração tem sido usada em todas as usinas a vapor modernas desde sua introdução no início da década de 1920.

Um processo de regeneração procura uma forma de aumentar a temperatura do líquido que sai da bomba, a água de alimentação, antes de entrar na caldeira. Isto é conseguido extraindo ou drenando o vapor da turbina em vários pontos, utilizando-o para aquecer a água de alimentação (ÇENGEL, BOLES, 2012).

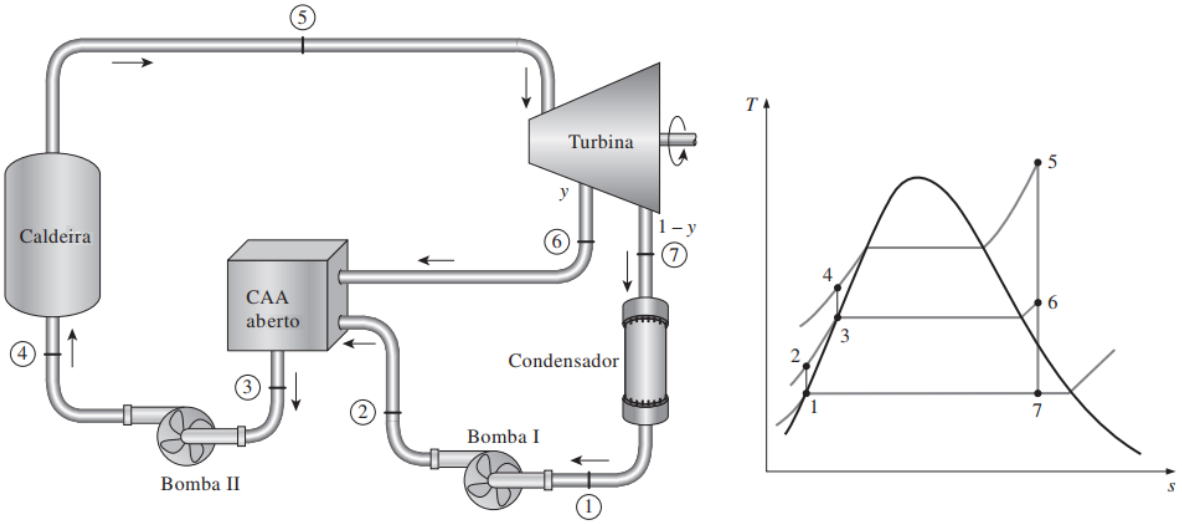
Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

O dispositivo onde a água de alimentação é aquecida por regeneração é chamado de regenerador ou aquecedor de água de alimentação (CAA).

A regeneração não só melhora a eficiência do ciclo, mas também fornece um meio conveniente de desarejamento da água de alimentação para evitar corrosão na caldeira. Da mesma forma, ajuda a controlar a grande vazão volumétrica de vapor nas etapas finais da turbina (ÇENGEL, BOLES, 2012).

O esquema de uma usina a vapor com um aquecedor de água de alimentação aberto (também chamado de ciclo regenerativo de estágio único) e o diagrama T-s do ciclo são mostrados na figura 10.

Figura 10 - Ciclo de Rankine regenerativo ideal com um aquecedor de água de alimentação aberto.



Fonte: adaptado de Çengel, Boles, 2012.

As interações de calor e trabalho de um ciclo de Rankine regenerativo com um aquecedor de água de alimentação podem ser expressas por unidade de massa de vapor que flui através da caldeira como (ÇENGEL, BOLES, 2012):

$$q_{entrada} = h_5 - h_4 \quad (14)$$

$$q_{saída} = (1 - y)(h_7 - h_1) \quad (15)$$

$$w_{turbina.saída} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \quad (16)$$

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

$$w_{bomba.entrada} = (1 - y)w_{bomba\ I.entrada} + w_{bomba\ II.entrada} \qquad (17)$$

Onde

$$y = \dot{m_6}/\dot{m}_5 \qquad (fração\ de\ vapor\ extraída) \qquad (18)$$

$$w_{bomba\ I.entrada} = v_1(P_2 - P_1) \qquad (19)$$

$$w_{bomba\ II.entrada} = v_3(P_4 - P_3) \qquad (20)$$

3.3. CICLOS COMBINADOS GÁS-VAPOR

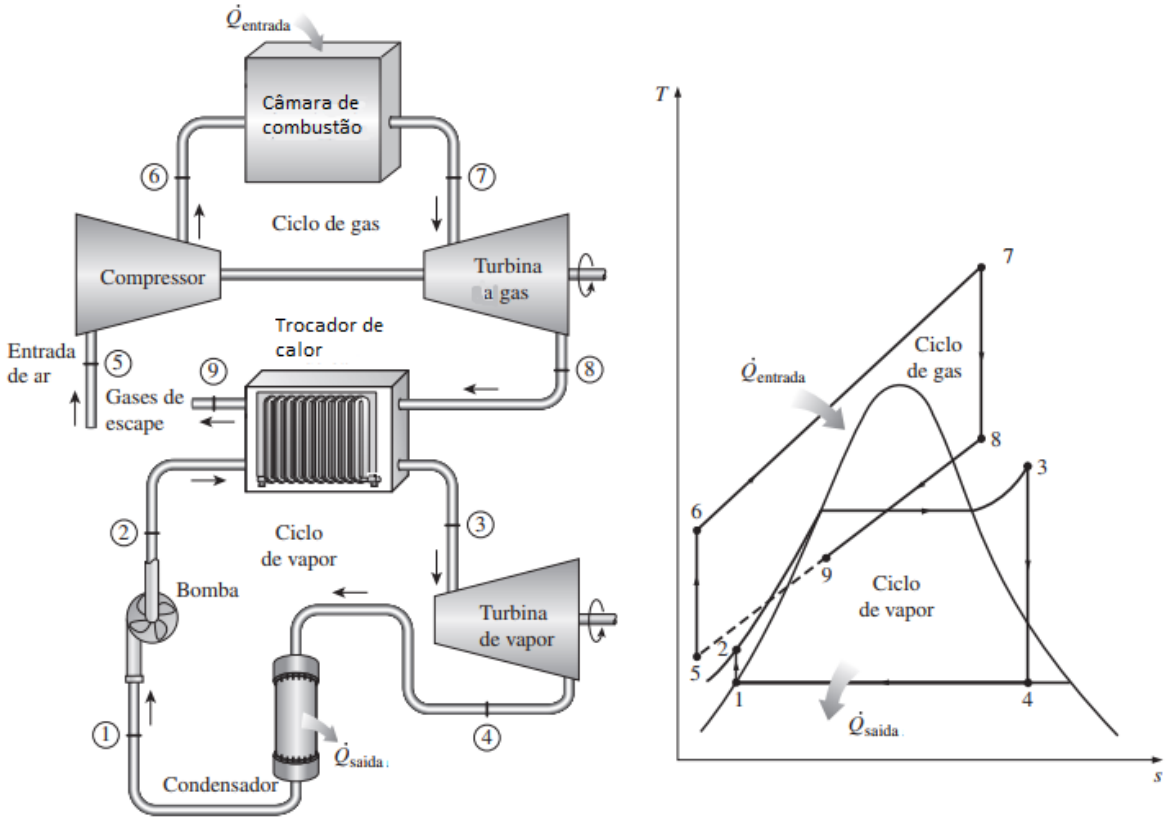
O termo ciclo combinado é reservado quase exclusivamente para a conjunção em uma única planta de dois ciclos termodinâmicos, Brayton e Rankine, que trabalham com diferentes fluidos: gás e água-vapor.

O ciclo que trabalha com gases de combustão-ar (Brayton) opera a uma temperatura superior ao ciclo cujo fluido é água-vapor (Rankine) e ambos são acoplados pelo trocador de calor gás/água-vapor, que é a caldeira de recuperação de calor. A união termodinâmica desses ciclos geralmente leva à obtenção de um desempenho global superior ao desempenho dos ciclos termodinâmicos individuais que o compõem (SABUGAL; GÓMEZ, 2006).

A figura 11 mostra o esquema e o diagrama T-s de uma planta de ciclo combinado. Por sua vez, o ciclo de vapor pode envolver regeneração e reaquecimento. A energia para o processo de reaquecimento pode ser fornecida acionando algum combustível adicional nos gases de exaustão ricos em oxigênio (ÇENGEL, BOLES, 2012).

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Figura 11 - Usina combinada de gás e vapor.



Fonte: Çengel, Boles, 2012.

O desempenho do ciclo combinado é dado pela relação:

$$\eta_{COMB} = \frac{w_{TG}+w_{TV}}{q_{TG}} \quad (21)$$

Onde

w_{TG} trabalho líquido do ciclo da turbina a gás

w_{TV} trabalho líquido do ciclo da turbina a vapor

q_{TG} calor fornecido no ciclo da turbina a gás

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

4. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA

4.1. POTÊNCIA LIQUIDA

A potência liquida é o principal parâmetro característico de uma usina de produção de energia elétrica. Isso depende das condições ambientais. Portanto, informar sobre a potência que a instalação pode atingir requer indicar exatamente em que condições ela é realizada. A potência liquida resultante deve ser maior que a potência efetiva necessária para o projeto, como condição fundamental para atender a demanda solicitada.

4.2. EFICIENCIA GLOBAL

A eficiência global da central termelétrica (CTE) é o quociente entre a energia elétrica gerada em um período de tempo e a energia térmica fornecida na forma de combustível no mesmo período, ambas expressas nas mesmas unidades, resultando em um parâmetro adimensional. É calculado com base na seguinte expressão (cicloscombinados.com):

$$\eta_{CTE} = \frac{P_{CTE}}{PCI_{combustible}\dot{m}_{CB}} \tag{22}$$

Onde $\dot{m}_{CB}$ é a vazão mássica de combustível do grupo de turbinas a gás.

4.3. TAXA DE CALOR

O consumo específico de energia ou taxa de calor é outra forma de indicar o desempenho. É definida como a quantidade de calor fornecida pelo combustível (energia química que é transformada em energia térmica através do processo de combustão) necessária para gerar uma unidade de energia elétrica, geralmente em kWh (cicloscombinados.com).

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Em outras palavras, é a razão entre a energia de entrada (calor) e a energia de saída (eletricidade). É calculado a partir da expressão (energia.renovetec.com):

$$Taxa\ de\ calor_{CTE} = \frac{3600}{\eta_{CTE}} \qquad (kJ/kWh) \tag{23}$$

Os fatores mais importantes que afetam a taxa de calor de uma CTE são (FUENTES, 2008):

- Fator de capacidade da planta.
- Excesso de Oxigênio na Caldeira.
- Temperatura e pressão do vapor principal e superaquecido
- Pressão de exaustão do condensador.
- Pré-aquecedores de água de alimentação.
- Pureza do Hidrogênio no Gerador.
- Resistência Térmica em Superfícies de Transferência de Calor.
- Instrumentação.
- Vazamentos de água e vapor.

4.4. CONSUMO ESPECIFICO DE VAPOR

O consumo específico de vapor (Steam Rate, abreviadamente SR) é a quantidade de vapor consumida pelo ciclo para gerar uma determinada unidade de potência (geralmente em kW) nos terminais do gerador acoplado ao ciclo de vapor (core.ac.uk).

A pressão e temperatura na entrada e saída da turbina a vapor, bem como sua eficiência isentrópica, são variáveis importantes para esse consumo. É calculado com a relação entre a vazão mássica de vapor (kg/h) e a potência elétrica gerada (kW):

$$SR = \frac{\dot{m}_v}{P_{cv}} \qquad (kg/kWh) \tag{24}$$

Onde m_v é a vazão de vapor que entra na TV e P_{cv} a potência gerada por ela.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

4.5. CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL (CEC)

É a quantidade total de combustível necessária para sustentar a potência elétrica gerada pela usina. É outro parâmetro de desempenho térmico e afeta diretamente os custos operacionais da planta. É calculado a partir da relação entre o HR do CTE e o PCI do combustível, conforme expresso na seguinte equação:

$$CEC = \frac{HR_{CTE}}{PCI_{\text{combustível}}} \quad (kg/kWh) \tag{25}$$

4.6. OUTROS PARÂMETROS

Por fim, existem outros fatores relevantes para a definição da planta, mais secundários ao diagnóstico que será feito neste trabalho. No entanto, alguns deles serão brevemente mencionados abaixo:

No caso de usinas de Ciclo Combinado, a configuração adotada que relaciona ambas as modalidades de ciclo podem variar de acordo com o número de módulos, turbinas a gás, bem como geradores (pode ser de eixo único ou utilizando um gerador para cada turbina). Também deve ser levado em conta que o combustível usado nas diferentes usinas varia. Os níveis de pressão podem ser um, dois ou três níveis, o que influenciará o desempenho do ciclo (cicloscombinados.com).

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

5. METODOLOGIA

A metodologia aplicada para o desenvolvimento do aplicativo e as sub-rotinas das variantes consideradas em cada ciclo termodinâmico são descritas nas seguintes etapas:

- O código em sua totalidade foi escrito na linguagem de programação Python versão 3.8.10, onde em cada sub-rotina destinada aos cálculos foram aplicados os respectivos modelos matemáticos que regem cada ciclo estudado, bem como suas respectivas variantes.
- A biblioteca CoolProp, versão 6.4.1, foi utilizada para extrair as propriedades termodinâmicas dos fluidos de trabalho. Essas propriedades, além de serem impressas na tela de resultados, também são usadas para realizar cálculos de parâmetros de desempenho.
- A interface gráfica do programa foi construída utilizando o módulo Tkinter.
- Por fim, as sub-rotinas são vinculadas às interfaces gráficas para formar o programa.

5.1. CÓDIGO

5.1.1. Python

Python é uma linguagem que remonta à década de 1990, e sua criação é atribuída ao holandês Guido van Rossum, recebe seu nome do programa de televisão da BBC “Monty Python's Flying Circus” e não tem nada a ver com répteis (Python.org).

É uma linguagem de programação poderosa e fácil de aprender. Possui estruturas de dados de alto nível eficientes e um sistema de programação orientado a objetos, simples, mas eficaz. A sintaxe elegante e a tipagem dinâmica do Python, juntamente com sua natureza interpretada, o tornam uma linguagem ideal para scripts e desenvolvimento rápido de aplicativos em muitas áreas, para a maioria das plataformas (Python.org).

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Python permite dividir programas em módulos que podem ser reutilizados em outros programas Python. É uma linguagem multiplataforma, portanto o mesmo código é compatível em qualquer plataforma (Windows, macOS, Linux) sem a necessidade de fazer nada, também possui uma enorme comunidade e um grande número de bibliotecas (Python.org).

5.1.2. CoolProp

CoolProp é o banco de dados usado para obter as propriedades termodinâmicas dos fluidos de trabalho. O meio utilizado para extrair as propriedades desses fluidos é a função PropsSI da biblioteca.

É uma biblioteca de C++ que implementa, entre outras coisas, equações de estado e propriedades de transporte de fluidos puros e pseudopuros para 122 componentes, propriedades de mistura usando formulações de energia de Helmholtz altamente precisas, interpolação tabular computacionalmente eficiente, etc (coolprop .org).

Possui termos de licença flexíveis e pode ser usado para projetos comerciais e trabalhos acadêmicos gratuitamente.

5.1.3. Tkinter

Tkinter é a interface padrão do Python para criar interfaces gráficas de usuário (GUI) e está incluído em todas as distribuições padrão do Python. Na verdade, é a única estrutura incorporada à Python Standard Library (activestate.com).

Essa "biblioteca" fornece aos usuários de Python uma maneira fácil de criar elementos GUI usando os widgets encontrados no kit de ferramentas Tk. Os widgets Tk podem ser usados para construir botões, menus, campos de dados, etc. em um aplicativo Python. Uma vez criados, esses widgets podem ser

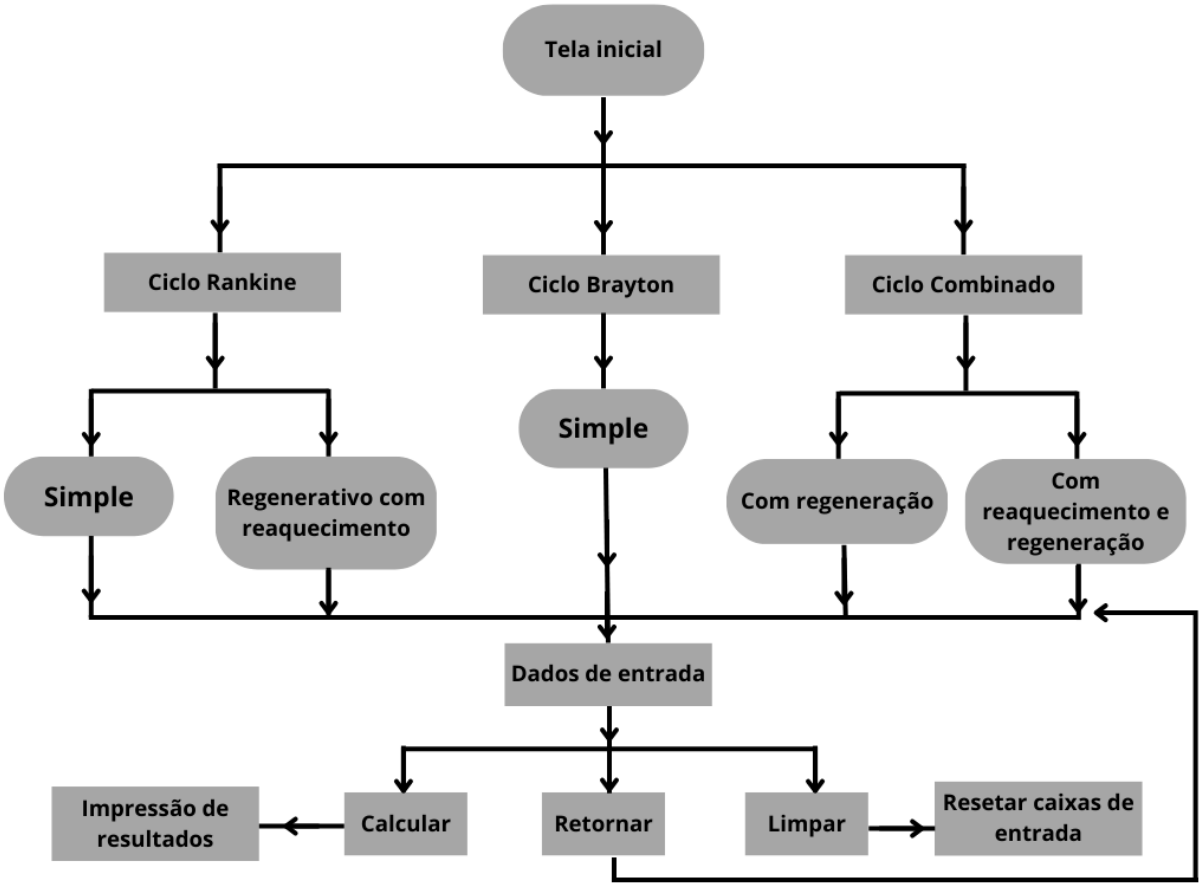
Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

associados ou interagir com recursos, funções, métodos, dados ou até mesmo outros widgets (activestate.com).

5.2. ALGORITMO GERAL

A figura 12 mostra o diagrama de blocos que ilustra o algoritmo geral de operação do programa.

Figura 12 - Diagrama de blocos geral do programa.



Fonte: o autor.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

6. RESULTADOS E ANÁLISE

6.1. INTERFACE

A seguir, se apresentam algumas capturas de tela da interface final do aplicativo criado. Ao executar o programa, o usuário encontra a tela de boas-vindas, figura 13, nesta tela podem ser encontrados três botões, cada um correspondendo a uma opção de ciclo disponível.

Figura 13 – Tela de início.

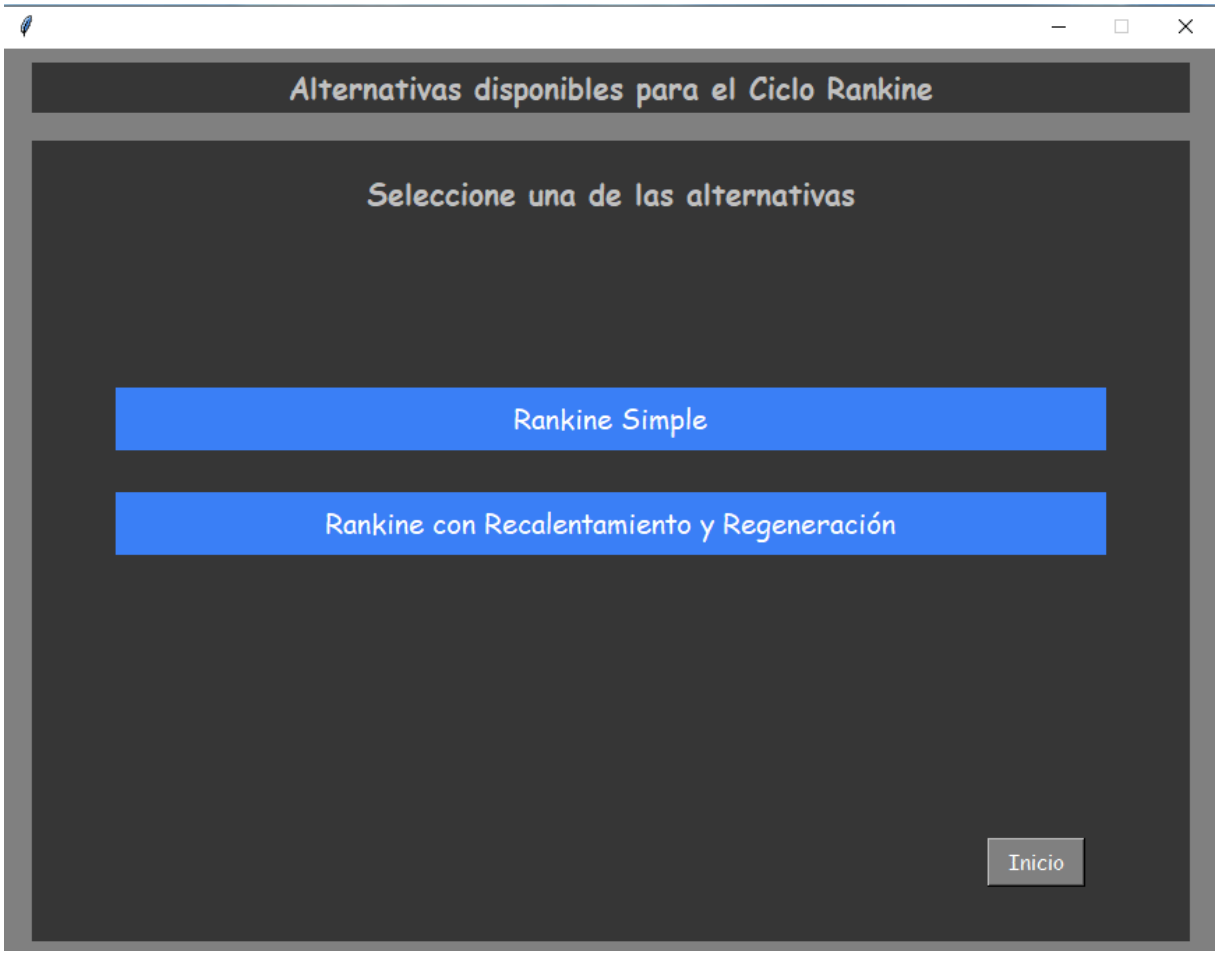
Fonte: o autor.

Ao clicar no primeiro botão (Ciclo Rankine) o aplicativo vai para uma tela intermediária, onde o usuário encontra as opções disponíveis para o ciclo de vapor, conforme mostra a figura 14. Nesta seção também pode-se encontrar um

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

botão na parte inferior com a inscrição “Inicio”, a ação deste botão é retornar à tela principal.

Figura 14 – Tela de alternativas disponíveis para o ciclo Rankine.



Fonte: o autor.

Uma vez selecionada a opção desejada, o programa vai para a tela onde são inseridos os dados de entrada e onde os resultados também serão impressos após a realização dos cálculos, veja a figura 15. A operação é bastante fácil e intuitiva nesta parte, basta preencher todos os campos de dados de entrada e clicar no botão calcular na parte inferior da tela, o aplicativo realizará os cálculos internamente e imprimirá os resultados nas caixas correspondentes.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Figura 15 – Tela onde são feitos os cálculos.

Fonte: o autor.

Os resultados apresentados na tela correspondem aos estados termodinâmicos de entalpias e entropias, reais e ideais, bem como aos principais parâmetros de desempenho de uma usina termelétrica. Um exemplo do cálculo realizado pode ser visto na figura 16.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Figura 16 – Exemplo de funcionamento do programa.

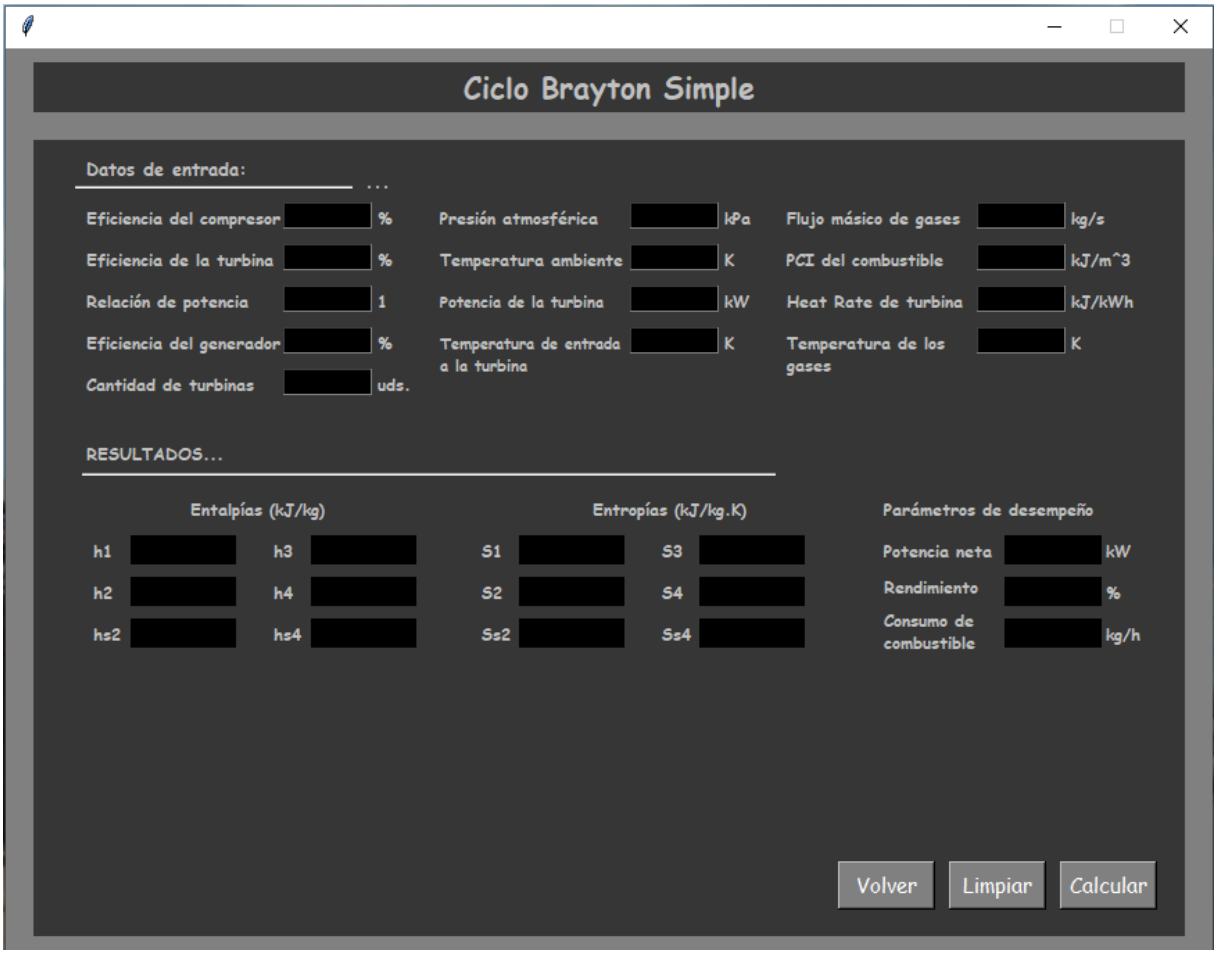
Fonte: o autor.

Outros dois botões podem ser vistos na parte inferior da tela de cálculo, ao lado do botão calcular, eles são: “Limpar” e “Voltar”. A função do botão Limpar é zerar todas as caixas, ou seja, deixa todas as caixas em branco novamente. No caso do botão Voltar, sua função é retornar à tela anterior.

Voltando à tela principal, se o usuário clicar na opção Ciclo Brayton, perceberá que o aplicativo o leva diretamente para a seção de entrada de dados, veja figura 17, isso porque para o referido ciclo há apenas uma opção, a de o “Brayton Simples”.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Figura 17 – Seção de entrada de dados para o ciclo Brayton simples.

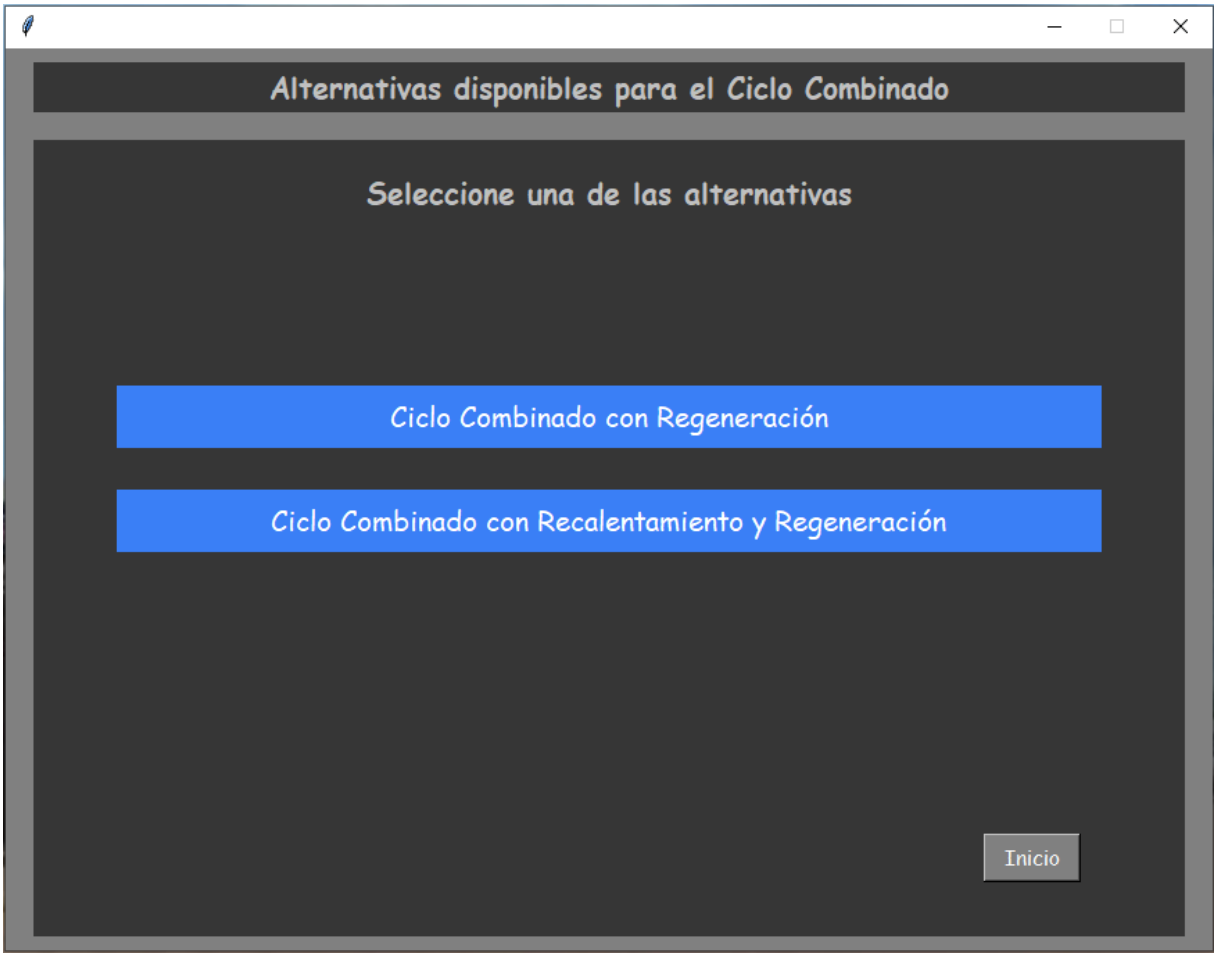


Fonte: o autor.

E para a última opção, o Ciclo Combinado, há também uma tela intermediária, pois há duas alternativas para este caso, conforme visto na figura 18. Em termos de funcionamento, é praticamente o mesmo que já foi explicado acima.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Figura 18 – Tela de alternativas do ciclo combinado.

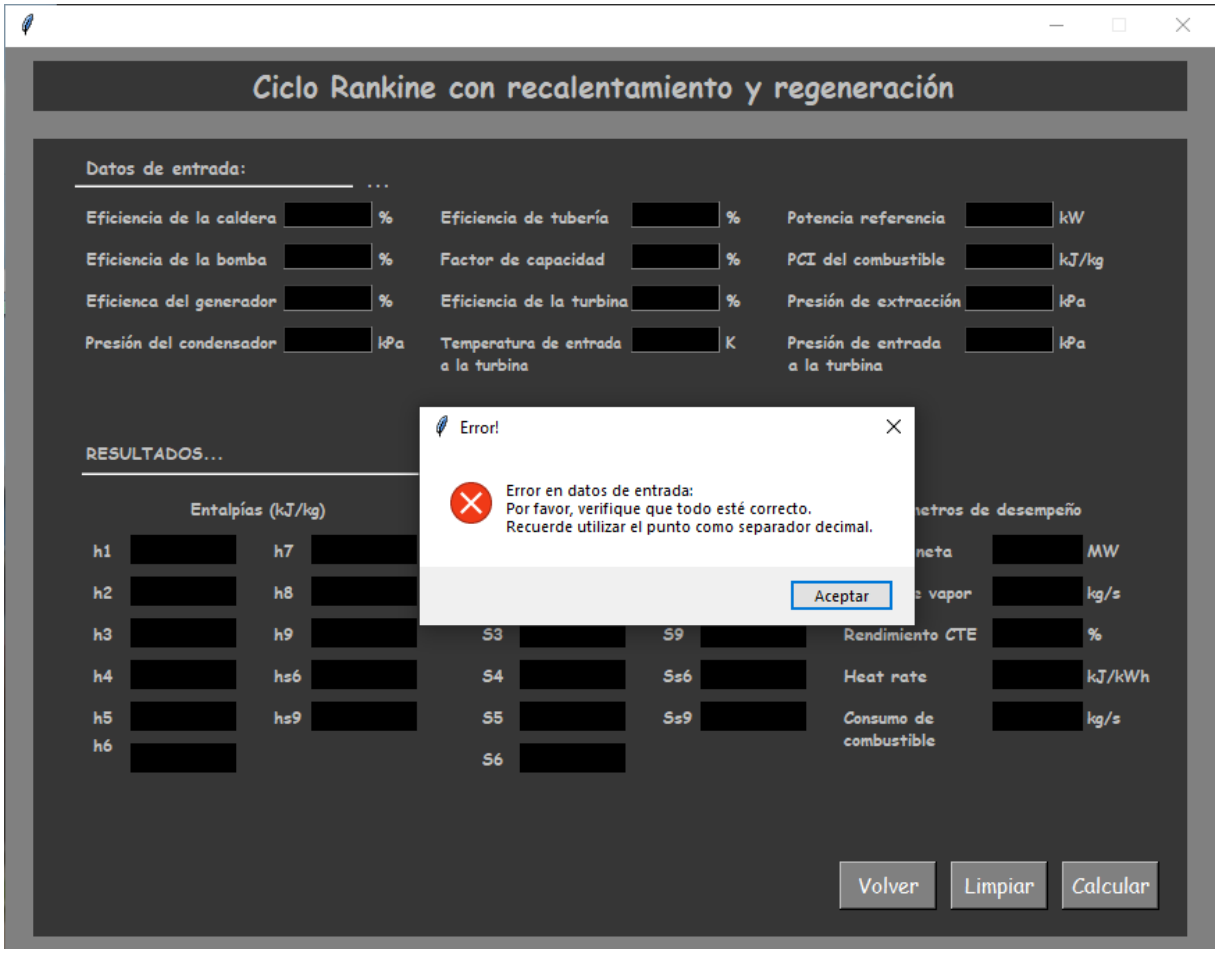


Fonte: o autor.

Ressalta-se também que o código possui um sistema de captura de erros, caso haja incompatibilidade com os dados inseridos pelo usuário. Quando o usuário digita um caractere que não é do tipo esperado pelo programa, ele lança uma mensagem na tela avisando do erro, como pode ser visto na figura 19.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Figura 19 – Mensagem de erro.



Fonte: o autor.

6.2. FUNCIONAMENTO

Nesta seção prossegue-se a analisar o funcionamento e a precisão do aplicativo. Foram feitos cálculos para algumas das opções oferecidas pelo programa e os resultados foram comparados com resultados obtidos por meio do software Engineering Equation Solver (EES).

Para o primeiro teste foram feitos cálculos para uma usina que trabalha com o ciclo Rankine com reaquecimento e regeneração, os dados de entrada utilizados podem ser vistos na figura 16 e os resultados obtidos em ambos os programas são apresentados nas tabelas 1 e 2.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Tabela 1 – Resultados para o caso do ciclo Rankine com reaquecimento e regeneração.

	Entalpia “h” (kJ/kg)			Entropia “S” (kJ/kg.K)		
Estado	Programa	EES	Diferencia (%)	Programa	EES	Diferencia (%)
1	279,21	279,21	-	0,915	0,915	-
2	284,29	284,3	0,00010	0,918	0,918	-
3	1088,43	1088,32	0,00110	2,799	2,798	0,00001
4	1121,3	1121,32	0,00020	2,811	2,811	-
5	3448,12	3449,07	0,00950	6,311	6,312	0,00001
6	2984,07	2984,02	0,00050	6,401	6,402	0,00001
6s	2932,51	2933,33	0,00820	6,311	6,312	0,00001
7	3640	3640	-	7,329	7,329	-
8	2984	2984	-	6,401	6,402	0,00001
9	2577,13	2577,13	-	7,676	7,677	0,00001
9s	2459,03	2459,03	-	7,329	7,329	-

Fonte: o autor.

Tabela 2 – Parâmetros de desempenho para o caso do ciclo Rankine com reaquecimento e regeneração.

Parâmetro	Programa	EES
Potência neta (MW)	671,84	671,84
Fluxo mássico vapor (kg/s)	572,32	572,15
Rendimento (%)	39,01	39,01
Heat Rate (kJ/kWh)	9228,87	9228,19
Consumo de combustível (kg/s)	35,96	35,96

Fonte: o autor.

Para o segundo teste foram feitos cálculos para uma usina que opera com a configuração de ciclo combinado 2x1 com regeneração, os resultados obtidos em ambos os programas são apresentados nas tabelas 3 e 4. Os dados de entrada utilizados podem ser encontrados no apêndice A.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Tabela 3 – Resultados para o caso do ciclo combinado com regeneração.

	Entalpia “h” (kJ/kg)			Entropia “S” (kJ/kg.K)		
Estado	Programa	EES	Diferencia (%)	Programa	EES	Diferencia (%)
1	298,53	296,61	0,01920	6,877	6,854	0,00023
2	677,63	663,73	0,13900	6,877	6,854	0,00023
2s	748,19	744,27	0,03920	6,996	6,971	0,00025
3	1695,82	1682,78	0,13040	8,038	8,008	0,00030
4	934,05	928,08	0,05970	8,038	8,008	0,00030
4s	1025,46	1019,47	0,05990	8,006	8,105	0,00099
5	483,92	481,75	0,02170	7,365	7,338	0,00027
6	3500,26	3500,54	0,00280	6,612	6,613	0,00001
7	3018,24	3018,25	0,00010	6,612	6,613	0,00001
7s	3076,08	3076,05	0,00030	6,71	6,71	-
8	2229,14	2229,14	-	6,612	6,613	0,00001
8s	2324	2324	-	6,889	6,889	-
9	289,27	289,27	-	0,944	0,944	-
10	292,1	292,1	-	0,944	0,944	-
10s	292,6	292,6	-	0,946	0,946	-
11	990,46	990,44	0,00020	2,611	2,611	-
12	1003,94	1003,94	-	2,611	2,611	-
12s	1006,32	1006,32	-	2,615	2,615	-

Fonte: o autor.

Tabela 4 – Parâmetros de desempenho para o caso do ciclo combinado com regeneração.

Parâmetro	Programa	EES
Potência neta (MW)	603,32	601,88
Steam Rate (kg/kWh)	1,844	1,844
Rendimento (%)	59,70	59,56
Heat Rate (kJ/kWh)	6030	6044
Consumo de combustível (kg/kWh)	0,1096	0,1098

Fonte: o autor.

Comparando os resultados do primeiro teste aqui apresentado, o do ciclo Rankine com reaquecimento e regeneração, pode-se observar que a diferença entre os valores obtidos por ambas as aplicações, tanto para as

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

propriedades termodinâmicas quanto para os parâmetros de desempenho, é mínima, sendo a diferença praticamente desprezível. Os esquemas usados como referência para numerar as propriedades termodinâmicas podem ser encontrados no apêndice B.

No segundo caso, ciclo combinado com regeneração, podem ser observadas diferenças mais consideráveis nas propriedades que têm a ver com a parte do ciclo a gás. Esta diferença pode ser devido à forma como as bibliotecas de cada software tratam o ar como fluido, já que o ar é na verdade uma mistura de gases, um fluido pseudo-puro, porém, em muitos casos é tratado como um fluido puro para simplificar as operações. No entanto, independentemente do tratamento que lhe é dado, sabe-se que é difícil trabalhar com precisão com misturas gasosas.

Para a parte do ciclo a vapor, os resultados mostram o mesmo padrão visto na opção anterior, ou seja, não são observadas diferenças no tratamento feito da água-vapor como fluido de trabalho por ambos os programas. Em relação aos parâmetros de desempenho, tabela 4, também são observadas diferenças mínimas, essas diferenças podem ser a causa das diferenças transportadas da seção do ciclo Brayton.

Deve-se mencionar que todas as alternativas oferecidas pelo programa foram testadas várias vezes, vários cálculos foram feitos em diferentes configurações e com dados de entrada diferentes, para cada uma das opções, a mesma comparação de resultados também foi feita em cada um dos casos e o padrão observado em todos eles foram praticamente o mesmo, nesta seção optou-se por mostrar apenas um par de casos, destacando que o mesmo padrão se repetiu em todos os testes realizados.

Diante de tudo isso, pode-se concluir que o aplicativo desenvolvido mais do que cumpre o seu propósito, tendo em conta que é uma ferramenta meramente didática e que as diferenças que apresenta ao compará-lo com um programa profissional e comercial são mínimas.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

7. CONCLUSÕES

O aplicativo aqui desenvolvido tinha como objetivo principal ser capaz de realizar cálculos de ciclo de potência com boa precisão, para que fosse confiável. Tudo isso apresentando uma interface intuitiva e amigável para facilitar ao máximo seu uso e este objetivo foi satisfatoriamente alcançado, uma vez que o funcionamento da aplicação foi validado com a comparação efetuada.

No entanto, é verdade que ainda há muito em que o programa pode ser melhorado, por exemplo; adicionar mais configurações possíveis para cada ciclo, dar-lhe a capacidade de imprimir diagramas T-s e P-v, melhorar a estética, introduzir algumas imagens de plugins, etc. Estas são melhorias que podem ser incluídas em trabalhos futuros.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

REFERÊNCIAS

ACTIVESTATE**. ¿Para Qué Sirve Tkinter Y Cómo Instalarlo?**. Disponible en: https://www.activestate.com/resources/quick-reads/what-is-tkinter-used-for-and-how-to-install-it/ Acceso en: 08/11/2022.

BORJA, D. P. **Diseño de un sistema de medición y control de uso de combustibles para las centrales de generación termoeléctrica del S.N.I.** Quito. 2009.

ÇENGEL, Y.; BOLES, M. **Termodinámica**. Séptima edición. México. 2012.

CICLOS COMBINADOS**. Parámetros característicos de un ciclo combinado**. Disponible en: http://www.cicloscombinados.com/index.php/4-parametroscaracteristicos-de-un-ciclo-combinado Acceso en: 5/11/2022.

COOLPROP.ORG**. Welcome to CoolProp**. Disponible en: http://www.coolprop.org/ Acceso en: 08/11/2022.

FUENTES, A. **La gerencia del combustible como elemento clave en centrales térmicas a vapor**. Caracas, Venezuela. Diciembre de 2008.

GONZÁLEZ, J. **Centrales Eléctricas**. FACET – UNT. 2017.

PYTHON.ORG**. El tutorial de Python**. Disponible en: https://docs.python.org/es/3/tutorial/ Acceso en: 08/11/2022.

RENOVETEC. **Que es el heat rate**. Disponible en: http://energia.renovetec.com/index.php/113-que-es-el-heat-rate Acceso en: 5/11/2022.

SABUGAL, G.; GÓMEZ, F. **Centrales térmicas de ciclo combinado *Teoría y proyecto*.** España. 2006.

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

APENDICES

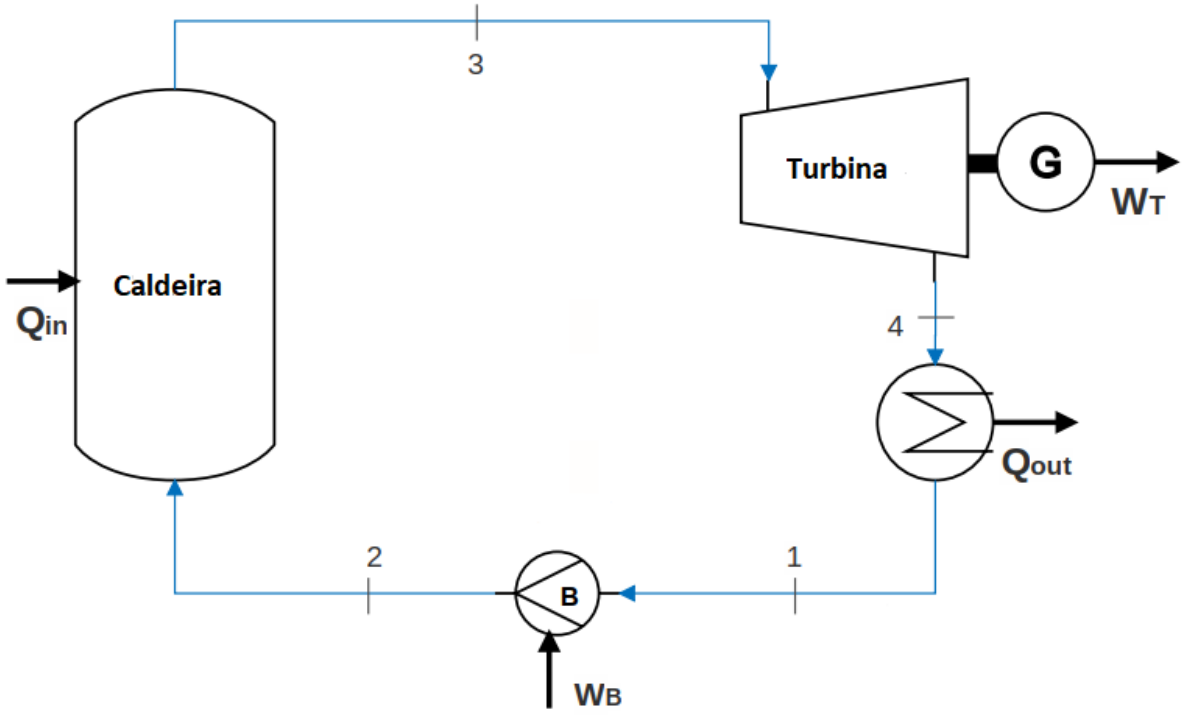
Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

APÊNDICE A – DADOS E RESULTADOS PARA O CASO DO CICLO COMBINADO COM REGENERAÇÃO.

Fonte: o autor

APÊNDICE B – ESQUEMAS UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA.

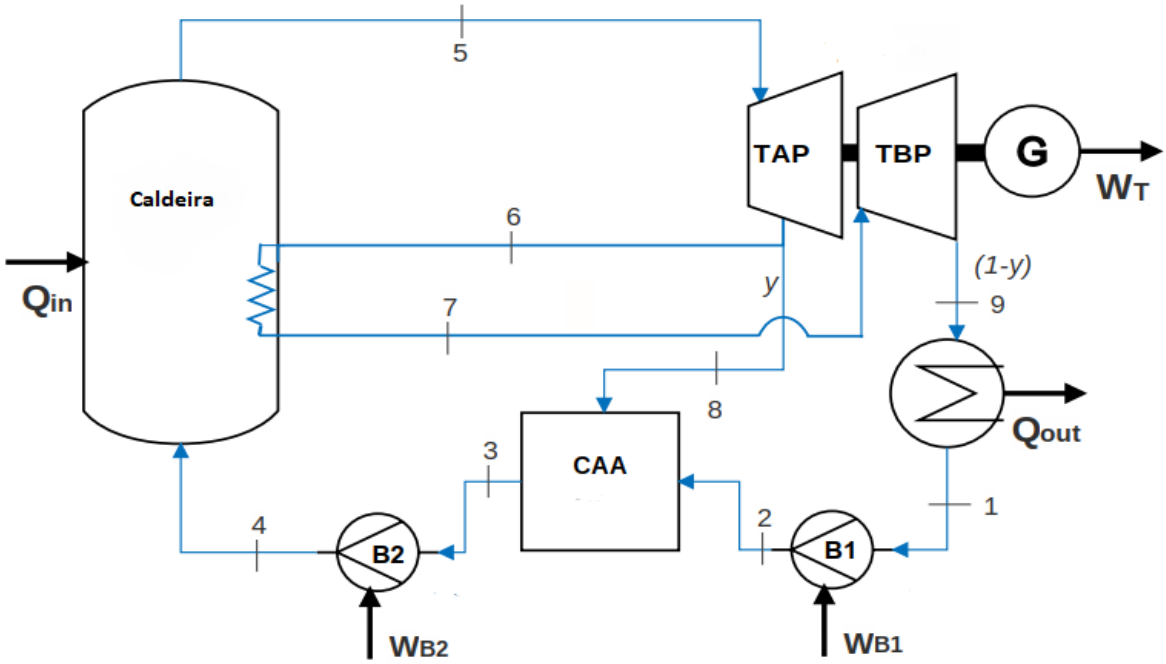
Apêndice B1 – Esquema do ciclo Rankine simples.



Fonte: o autor

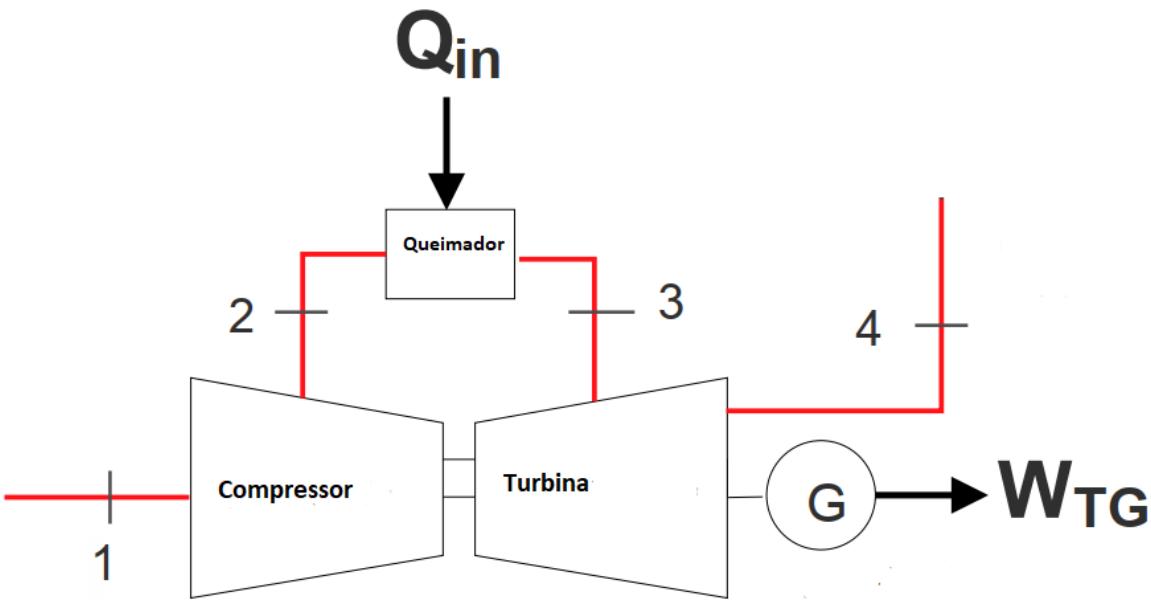
Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Apêndice B2 – Esquema do ciclo Rankine com reaquecimento e regeneração.



Fonte: o autor

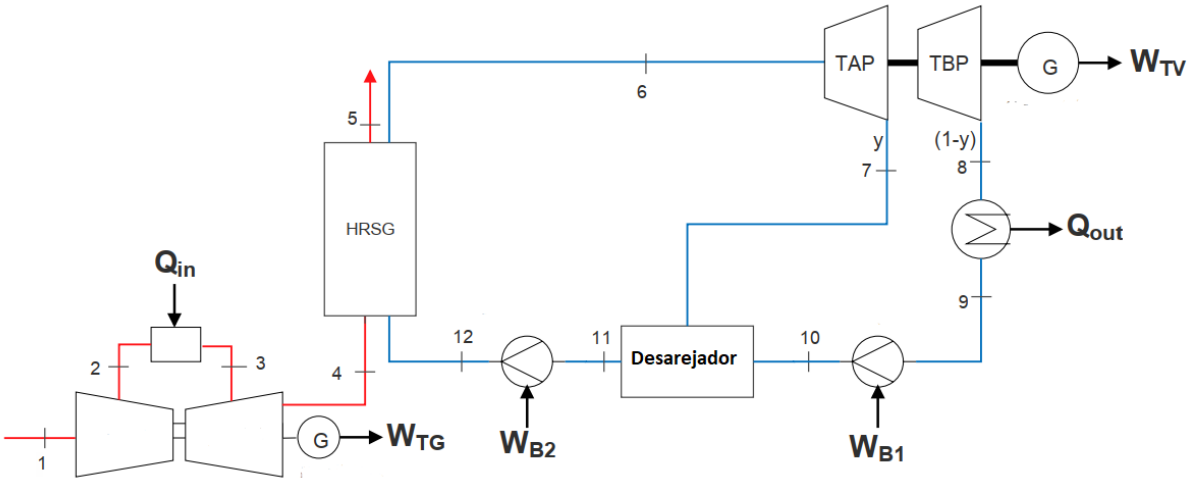
Apêndice B3 – Esquema do ciclo Brayton simples.



Fonte: o autor

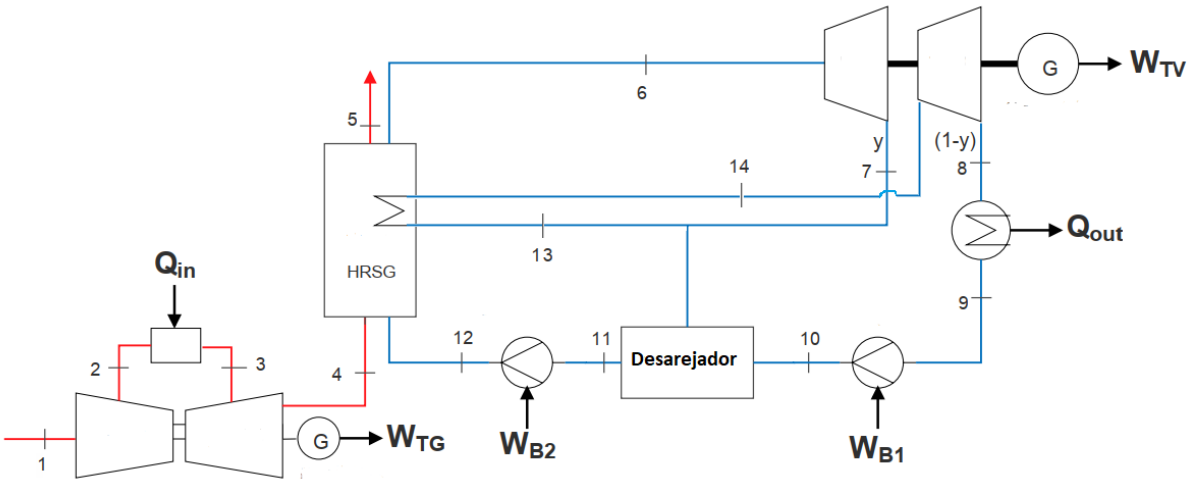
Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12

Apêndice B4 – Esquema do ciclo combinado com regeneração.



Fonte: o autor

Apêndice B5 – Esquema do ciclo combinado com reaquecimento e regeneração.



Fonte: o autor

Versão Final Homologada
02/01/2023 08:12