

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

RODRIGO APARECIDO DA SILVA

**SIMULAÇÃO TERMODINÂMICA DOS CICLOS DE RANKINE E COMBINADO
BRAYTON - RANKINE UTILIZANDO SIMULINK**

Lorena
2019

RODRIGO APARECIDO DA SILVA

**SIMULAÇÃO TERMODINÂMICA DOS CICLOS DE RANKINE E COMBINADO
BRAYTON - RANKINE UTILIZANDO SIMULINK**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Escola de
Engenharia de Lorena da
Universidade de São Paulo como
requisito parcial para conclusão
da Graduação do curso de
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Félix Monteiro
Pereira

Lorena
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

da Silva, Rodrigo Aparecido

Simulação termodinâmica dos ciclos de Rankine e
combinado Brayton - Rankine utilizando simulink /
Rodrigo Aparecido da Silva; orientador Félix
Monteiro Pereira. - Lorena, 2019.
42 p.

Monografia apresentada como requisito parcial
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia
Química - Escola de Engenharia de Lorena da
Universidade de São Paulo. 2019

1. Rankine. 2. Brayton-rankine. 3. Simulink
(matlab). 4. Eficiência. I. Título. II. Pereira,
Félix Monteiro , orient.

RESUMO

SILVA, R. A. Simulação termodinâmica dos ciclos de Rankine e combinado Brayton - Rankine utilizando Simulink. 2019. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2019.

A humanidade necessita de energia para que possa crescer e se desenvolver. Com isso é necessário sempre buscar fontes de geração cada vez mais eficientes e limpas. Ao longo dos anos diversos sistemas foram estudados, construídos e utilizados, dentre eles destaca-se o ciclo de Rankine, que possui diversas configurações visando aumentar o rendimento do processo. Esse tipo de sistema é responsável pela geração da maior parte da energia elétrica produzida no mundo, em usinas termoeletricas e term nucleares. O presente trabalho teve como objetivo estudar os ciclos de Rankine e combinado Brayton-Rankine, através da simulação de processos termodinamicos na plataforma Simulink (MATLAB), utilizando os principios da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica e rotinas computacionais que permitem prever as propriedades da água e do ar, a fim de demonstrar os processos de geração de energia de forma simples e intuitiva. As simulações foram realizadas com base em problemas presentes na literatura, para que os resultados obtidos para a simulação proposta para o ciclo de Rankine fossem validados. Após a validação da utilização da plataforma de simulação e das rotinas computacionais para predição das propriedades termodinamicas para o ciclo de Rankine, procedeu-se à simulação de um ciclo combinado Brayton-Rankine para o qual foi obtida uma eficiência térmica superior àquelas dos ciclos individuais pelos quais esse é composto.

Palavras-chave: Rankine, Brayton-Rankine, Simulink, Eficiência.

ABSTRACT

SILVA, R. A. Thermodynamic simulation of Rankine and Brayton - Rankine cycles using Simulink. 2019. 38 f. Monograph (Undergraduate Chemical Engineering Degree Program) – Lorena School of Engineering, University of São Paulo, 2019.

Humanity needs energy to grow and develop. With this, it is always necessary to look for increasingly efficient and clean generation sources. Over the years several systems have been studied, built and used, among them the Rankine cycle, which has several configurations aiming to increase the process yield. This type of system is responsible for the generation of most of the electricity produced in the world, in thermoelectric and thermonuclear plants. The present work aimed to study the Rankine and Brayton-Rankine combined cycles by simulating thermodynamic processes in the Simulink platform (MATLAB), using the principles of the 1st and 2nd Laws of Thermodynamics and computational routines that allow predicting the properties of water and air in order to demonstrate power generation processes in a simple and intuitive way. The simulations were performed based on problems present in the literature, so that the results obtained for the simulation proposed for the Rankine cycle were validated. After validating the use of the simulation platform and the computational routines to predict the thermodynamic properties for the Rankine cycle, a combined Brayton-Rankine cycle was simulated for which thermal efficiency was higher than those of the individual cycles by the Rankine cycle which is composed.

Keywords: Rankine, Brayton-Rankine, Simulink (MATLAB), Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo Rankine Simples	10
Figura 2 - Diagrama T vs S para o ciclo Rankine Ideal e Real	13
Figura 3 - Ciclo Rankine com Reaquecimento.....	14
Figura 4 - Ciclo Rankine Regenerativo	15
Figura 5 - Ciclo Combinado Brayton-Rankine	16
Figura 6 - Bloco Constant	21
Figura 7 - Bloco Add ou Subtract	21
Figura 8 - Bloco divid	21
Figura 9 - Bloco product	22
Figura 10 - Bloco Mux	22
Figura 11 - Bloco MATLAB Function	22
Figura 12 - Bloco Display	22
Figura 13 - Aplicação das Equações de balanço de massa e energia, através dos blocos do Simulink, para programação da Turbina	27
Figura 14 - Construção de um ciclo de Rankine, etapas da Turbina + Bomba	28
Figura 15 - Diagrama SIMULINK para o ciclo de Rankine	29
Figura 16 - Diagrama SIMULINK para o ciclo de Rankine com Reaquecimento	31
Figura 17 - Diagrama SIMULINK para o ciclo de Rankine Regenerativo	33
Figura 18 - Diagrama SIMULINK para o ciclo combinado Brayton-Rankine	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades para o ciclo Rankine Ideal	25
Tabela 2 - Propriedades para o ciclo Rankine Real	26
Tabela 3 - Propriedades para o ciclo Rankine com Reaquecimento.....	30
Tabela 4 - Propriedades para o ciclo Rankine Regenerativo	32
Tabela 5 - Propriedades para o ciclo combinado Brayton-Rankine	34

LISTA DE SÍMBOLOS

W: trabalho (KJ/s)

m: vazão mássica (Kg/s)

ν : volume específico (m^3/Kg)

g: gravidade (m/s^2)

H: entalpia (KJ/Kg)

P: pressão (bar)

Q: calor (KJ/s)

S: entropia (KJ/(Kg.K))

T: Temperatura (K)

U: energia interna (KJ/Kg)

V: velocidade (m/s)

z: altura (m)

h: entalpia vapor (KJ/ Kg de vapor)

h': entalpia gás (KJ/ Kg de gás)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Ciclo Rankine	13
2.2	Configurações do ciclo de Rankine	14
2.3	Ciclo combinado Brayton-Rankine	15
2.4	Simulink - MATLAB	17
2.5	Equacionamento	17
2.5.1	Balanco de Massa	17
2.5.2	Balanco de Energia	18
2.5.3	Balanco de Entropia	18
2.5.4	Demais equações	18
3	METODOLOGIA	21
3.1	Simulink	21
3.2	Validação dos programas	23
3.2.1	Enunciado para o Ciclo de Rankine ideal	23
3.2.2	Enunciado para o Ciclo de Rankine ideal com efeitos da pressão e temperatura	23
3.2.3	Enunciado para o Ciclo de Rankine com Reaquecimento	24
3.2.4	Enunciado para o Ciclo de Rankine Regenerativo	24
3.2.5	Enunciado para o Ciclo Combinado Brayton-Rankine	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	Ciclo de Rankine ideal	25
4.2	Ciclo de Rankine com Reaquecimento	30
4.3	Ciclo de Rankine Regenerativo	32
4.4	Ciclo Combinado Brayton-Rankine	34
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	38
	APÊNDICE A	40

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais Genésio e Neide por terem sempre me apoiado em todas as minhas decisões, por sempre me incentivar a nunca desistir e por todos os sacrifícios que fizeram para que eu pudesse estudar.

A minha companheira Nathália, que esteve ao meu lado durante toda a graduação, cuidando de nosso filho e sonhando com o futuro que estamos construindo juntos.

Ao meu grande amigo, Engenheiro Químico Pedro Henrique Ferreira Bueno que, durante sua permanência como representante discente na EEL-USP, atuou diretamente na defesa de minha matrícula na instituição, enquanto a administração queria cancelar minha vaga por conta do Serviço Militar Obrigatório.

Ao Prof. Dr. Félix Monteiro Pereira que aceitou orientar este trabalho na reta final da graduação, e todos os demais professores que contribuíram em minha formação acadêmica.

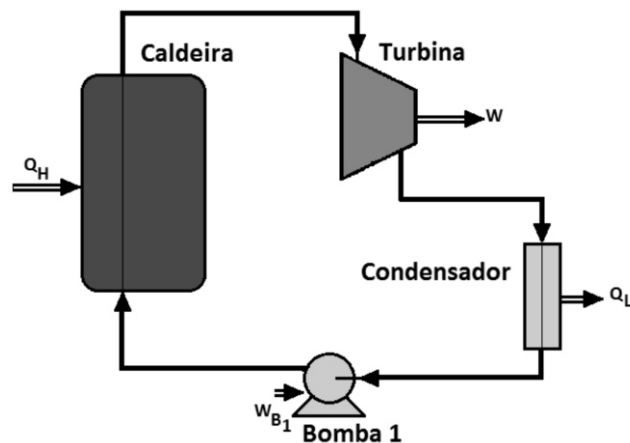
1 INTRODUÇÃO

Praticamente tudo que seja criado ou utilizado necessita de energia, seja térmica, elétrica, mecânica, entre outras.

Há diversas formas de se conseguir energia mecânica ou elétrica, sendo umas mais baratas ou mais eficientes que outras. As usinas termoeletricas ainda vêm sendo as mais utilizadas a nível mundial para suprir as necessidades energéticas (AHMADI et al., 2019).

A grande maioria das usinas termoeletricas funciona a partir de ciclos de potência a vapor, utilizando água como fluido de trabalho, os chamados ciclos de Rankine (KUMAR; MOHAN, 2019). A Figura 1 representa o esquema de um ciclo de Rankine simples.

Figura 1 - Ciclo Rankine Simples



Fonte: Castillo e Freire (2015)

Normalmente considera-se o ciclo Rankine como um sistema ideal, onde a bomba e a caldeira funcionam de forma isentrópica, ou seja, de forma reversível. Porém, na realidade ocorrem perdas de energia no sistema. Por isso, é possível que as eficiências dos equipamentos envolvidos sejam consideradas nos cálculos, tornando os resultados mais próximos possíveis da realidade (DAI; SHI; QIAN, 2019).

O estudo desses ciclos é de extrema importância, e diversos métodos computacionais vêm sendo empregados ao longo do tempo, para entender e otimizar cada vez mais as plantas de geração de energia (DAI; SHI; QIAN, 2019, MORAN et al., 2012).

O Simulink é um software de programação incorporado ao software MATLAB, que possui aplicações nas mais diversas áreas da ciência. Trata-se de um ambiente de diagrama de blocos, como um fluxograma, ao qual cada bloco realiza uma função específica. Há uma biblioteca com diferentes tipos de blocos, desde operadores matemáticos simples de soma e subtração, blocos que realizam integração e derivação de funções, até blocos que incorporam rotinas em MATLAB, C++ e Python, e as aplicam ao sistema. Clicando e movimentando esses blocos, pode-se facilmente interligá-los, realizando as operações desejadas, e os resultados podem ser exibidos na forma numérica e gráfica (MATSUMOTO, 2009).

Além da biblioteca de blocos existente, há a possibilidade de o usuário criar e editar seus próprios blocos, ou até mesmo adquirir bibliotecas prontas de empresas especializadas. Assim infinitas ações podem ser executadas nessa plataforma de modelagem e simulação (MATSUMOTO, 2009).

As propriedades termodinâmicas da água e do ar atmosférico são tabeladas, e estão presentes em diversas literaturas (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2001). Porém, existe uma função chamada XSteam, que nada mais é que uma rotina do MATLAB que contém essas tabelas, e pode fornecer as propriedades da água a partir de duas propriedades conhecidas, como pressão e temperatura por exemplo, pode fornecer outras propriedades, como entropia, entalpia, volume específico, entre outras (WALES et al., 2019).

Essas propriedades obtidas com o XSteam seguem os parâmetros da "International Association for Properties of Water and Steam Industrial Formulation 1997 (IAPWS IF-97)". O código desse programa é livre, e os valores podem ser obtidos dentro dos intervalos de pressão e temperatura de 0-1000 bar and 0-2000°C (WALES et al., 2019).

Combinando o XSteam e o Simulink, é possível modelar as mais diferentes combinações de ciclos de potência a vapor, obtendo resultados precisos (WALES et al., 2019).

As propriedades termodinâmicas do ar atmosférico são obtidas interpolando-se os valores contidos do estudo realizado por Reynolds (1979).

1.1 Objetivos

O trabalho tem como objetivo principal realizar a simulação de ciclos termodinâmicos de potência a vapor (Rankine) e combinados vapor-gás (Brayton-Rankine), utilizando a ferramenta computacional Simulink-Matlab.

Para atingir este objetivo principal são propostos os seguintes objetivos específicos:

- estudar a teoria envolvida nas 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica;
- avaliar a predição das propriedades termodinâmicas da água e do ar, tais como entalpia, e entropia por de interpolação dos valores contidos nas tabelas termodinâmicas de propriedades das substâncias;
- comparar os resultados obtidos na simulação com a literatura para validar a programação realizada no Simulink-MatLab para o ciclo de Rankine;
- analisar a eficiência energética obtida para o ciclo combinado Brayton-Rankine.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A 1ª Lei da Termodinâmica se refere ao princípio da conservação de energia, e elucida que a energia que entra em um sistema é a mesma que sai do mesmo, podendo ou não sofrer transformações (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Para que um processo ocorra, ele obrigatoriamente deve obedecer à 1ª Lei da Termodinâmica, porém o cumprimento dessa lei não garante que o sistema realmente irá funcionar, por isso é utilizada a 2ª Lei da Termodinâmica, que introduz o conceito da entropia, que pode ser descrita como a medida quantitativa do grau de desordem de um sistema (ÇENGEL; BOLES, 2013).

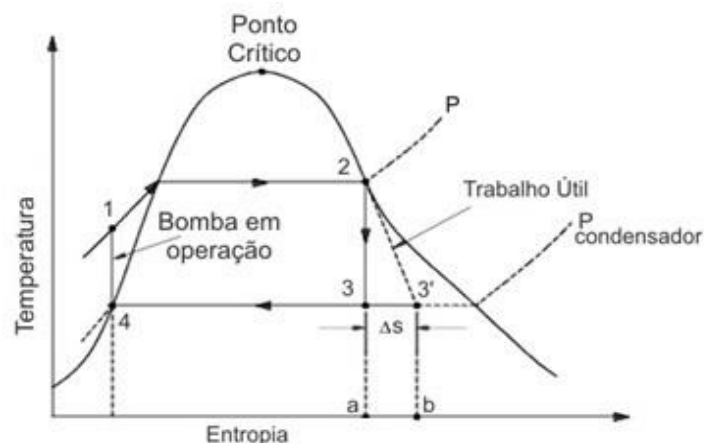
Ao contrário da energia, a entropia é uma propriedade que não se conserva. Há vários enunciados para a segunda lei, que ditam condições para que os sistemas possam funcionar. Somente em processos ideais ocorre a conservação de entropia, os processos reais só ocorrem se a entropia gerada no processo for maior ou igual a zero, caso contrário, o sistema é impossível (ÇENGEL; BOLES, 2013).

2.1 Ciclo de Rankine

O ciclo de Rankine é um sistema que converte calor em trabalho, e esse trabalho pode ser aproveitado como energia mecânica, ou na geração de energia elétrica (LIU et al., 2019).

Seu funcionamento pode ser observado mais facilmente em um diagrama de fases temperatura – entropia, ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama T vs S para o ciclo Rankine Ideal e Real



Fonte: Wiser (2000).

Como observado na Figura 2, o ciclo envolve (ÇENGEL; BOLES, 2013):

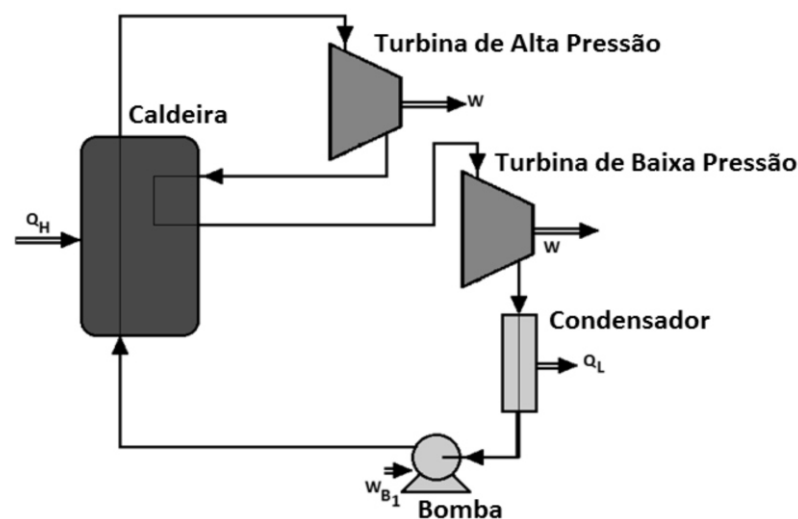
- o uso de uma caldeira, que pode ser alimentada por diferentes combustíveis e aquece a água (estado 1) até o estado de vapor (estado 2), que é direcionado a uma turbina;
- a turbina irá gerar o trabalho (se a eficiência da turbina for 100,0% se realizará um processo de expansão isentrópico atingindo o estado 3, caso contrário realiza-se um processo de expansão real atingindo o estado 3');;
- após o trabalho ser gerado, a água perde pressão e temperatura e é resfriada (condensada) seguidamente em um trocador de calor (condensador) atingindo o estado 4;
- saindo do condensador, a água é comprimida em uma bomba para retornar ao estado 1 (se a eficiência da bomba for 100,0% se realizará um processo de compressão isentrópico, caso contrário realiza-se um processo de compressão real), e retornar à caldeira para recomençar o ciclo.

2.2 Configurações do ciclo de Rankine

O ciclo de Rankine pode sofrer diversas modificações, buscando aumentar sua eficiência e a produção de trabalho. As alterações mais comuns são o Ciclo Rankine Regenerativo, o Ciclo Rankine com Reaquecimento e o Ciclo Combinado (ÇENGEL; BOLES, 2013).

A Figura 3 apresenta o funcionamento do ciclo de Rankine com reaquecimento.

Figura 3 - Ciclo Rankine com Reaquecimento

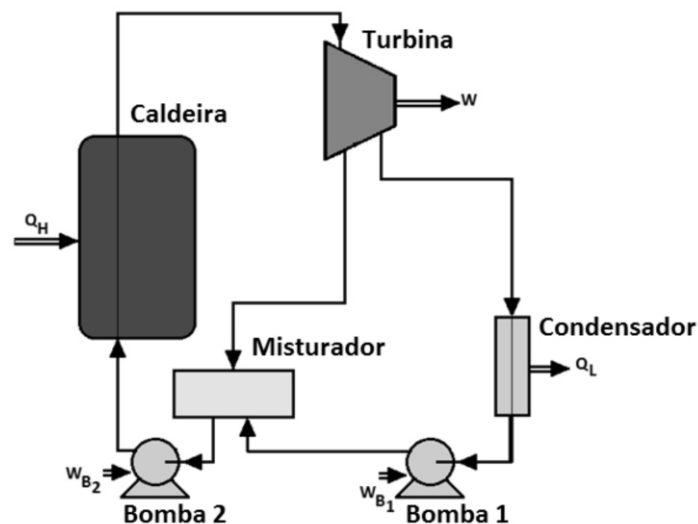


Fonte: Castillo e Freire (2015).

Como mostrado na Figura 3 o ciclo de Rankine com reaquecimento opera utilizando duas turbinas em série. A primeira turbina recebe o vapor da caldeira à alta pressão, liberando-o de tal maneira a evitar sua condensação. Este vapor é então reaquecido, utilizando o calor da própria caldeira, e é utilizado para acionar uma segunda turbina de baixa pressão. Entre outras vantagens, isto impede a condensação do vapor no interior das turbinas durante sua expansão, o que poderia danificar seriamente as pás da turbina (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2001).

A Figura 4 apresenta o diagrama de fluxo de um ciclo de Rankine regenerativo.

Figura 4 – Ciclo de Rankine Regenerativo



Fonte: Castillo e Freire (2015).

Como mostra a Figura 4, no ciclo regenerativo o fluido é reaquecido após sair do condensador, aproveitando parte do calor contido no fluido liberado pela turbina. Isto aumenta a temperatura média do fluido em circulação, o que aumenta a eficiência termodinâmica do ciclo (MORAN et al., 2012).

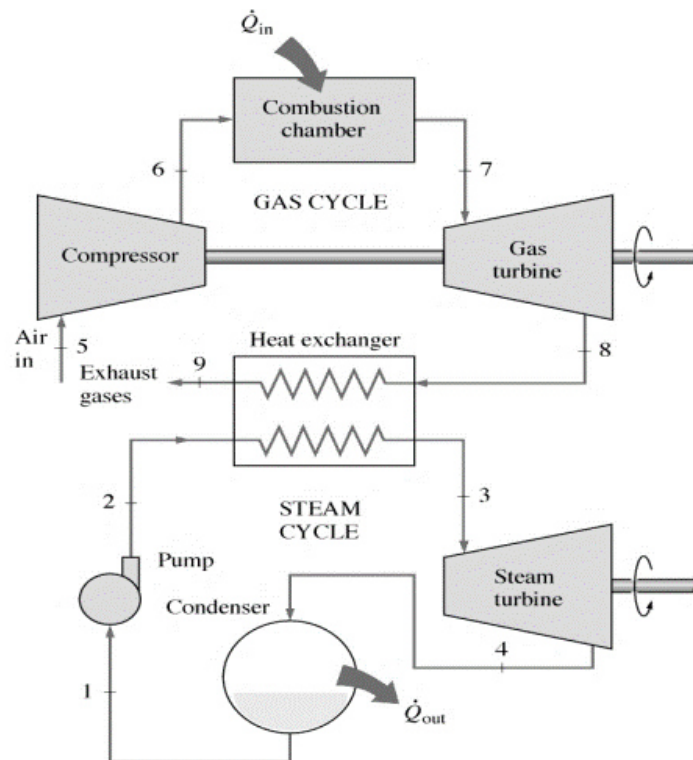
2.3 Ciclo combinado Brayton-Rankine

O ciclo combinado Brayton-Rankine ilustrado na Figura 5 apresenta eficiência térmica mais alta que qualquer um dos ciclos já citados funcionando individualmente (ÇENGEL; BOLES, 2013).

O chamado Ciclo Combinado é um ciclo que gerado pela união de um ciclo de potência a vapor, com um ciclo de turbina a gás. O ciclo combinado de maior interesse é o Brayton-Rankine.

O ciclo Brayton é um ciclo fechado no qual o ar atmosférico é admitido no compressor, onde a temperatura e pressão são elevadas. O ar a alta pressão recebe calor de uma fonte externa à pressão constante, e os gases resultantes em alta temperatura entram na turbina e se expandem, produzindo trabalho. Logo após a expansão, os gases passam por um processo de rejeição de calor (à pressão constante) para o ambiente (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Figura 5 - Ciclo Combinado Brayton-Rankine



Fonte: Çengel e Boles (2013).

O ciclo é formado por 4 etapas reversíveis:

- compressão isentrópica (em um compressor);
- fornecimento de calor à pressão constante;
- expansão isentrópica (em uma turbina);
- rejeição de calor à pressão constante.

Normalmente os ciclos de turbina a gás operam em temperaturas mais altas que os ciclos de potência a vapor. Com isso faz sentido a engenharia aproveitar a alta temperatura dos gases quentes de exaustão da turbina do ciclo Brayton como fonte de calor para o ciclo de Rankine, utilizando um trocador de calor que funciona similarmente como uma caldeira (ÇENGEL; BOLES, 2013).

2.4 Simulink - MATLAB

O Simulink é uma ferramenta computacional do software de programação MATLAB. Trata-se de um ambiente de diagrama de blocos, como um fluxograma, ao qual cada bloco realiza uma função específica. Existem diversos tipos de blocos, desde operadores matemáticos simples de soma e subtração, até blocos que incorporam rotinas em MATLAB e as aplicam ao sistema. Clicando e arrastando esses blocos, pode-se facilmente interligá-los, realizando as operações desejadas (MATSUMOTO, 2009).

A função XSteam, é que um programa livre e de código aberto que contém registradas as propriedades termodinâmicas da água para todos os estados termodinâmicos (WALES et al., 2019).

As propriedades termodinâmicas do ar utilizadas são obtidas através do estudo realizado por Reynolds (1979).

2.5 Equacionamento

A simulação foi realizada com base nas 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2001), utilizando os balanços de massa, energia e entropia (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2007), mostrados nas equações (1), (2) e (3):

2.5.1 Balanço de Massa:

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{i=0}^n (m)_{entrada} - \sum_{i=0}^n (m)_{saída} \quad (1)$$

2.5.2 Balanço de Energia:

$$\begin{aligned} \frac{d \left[m \left(U + \frac{V^2}{2} + zg \right) \right]}{dt} \\ = \sum_{i=0}^n m \left(H + \frac{V^2}{2} + zg \right) entrada \\ - \sum_{i=0}^n m \left(H + \frac{V^2}{2} + zg \right) saída \pm \sum_{i=0}^n (Q) \pm \sum_{i=0}^n (W) \end{aligned} \quad (2)$$

2.5.3 Balanço de Entropia

$$\frac{d(mS)}{dt} = \sum_{i=0}^n (mS)_{in} - \sum_{i=0}^n (mS)_{out} \pm \frac{\delta Q}{T_0} \pm \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial Q}{T} \right) + S_{gerada} \quad (3)$$

2.5.4 Demais equações

Algumas considerações são realizadas para que os cálculos possam ser feitos: sistema adiabático, reversível e estado estacionário, e energias potencial e cinética desprezíveis. Também serão consideradas as eficiências das bombas e turbinas. A partir das considerações e das equações dos balanços, é possível obter-se as equações (4) a (9) para o estudo dos ciclos de potência (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Para o ciclo Rankine:

$$Q_{caldeira} = H_{saída} - H_{entrada} \quad (4)$$

$$W_{turbina} = -(H_{saída} - H_{entrada}) \quad (5)$$

$$W_{bomba} = v \times (P_{saída} - P_{entrada}) \quad (6)$$

$$Q_{condensador} = (H_{saída} - H_{entrada}) \quad (7)$$

Para o ciclo Brayton:

$$Q_{\text{câmara de combustão}} = (H_{\text{saída}} - H_{\text{entrada}}) \quad (8)$$

$$W_{\text{compressor}} = (H_{\text{saída}} - H_{\text{entrada}}) \quad (9)$$

As eficiências das turbinas (equação 10), bombas (equação 11), e compressores (equação 12) serão consideradas, logo deve-se considerar as equações a seguir para o cálculo do trabalho real nos equipamentos:

$$W_{\text{turbina}} = W_{\text{turbina ideal}} \times \text{Eficiência}_{\text{turbina}} \quad (10)$$

$$W_{\text{bomba}} = \frac{W_{\text{bomba ideal}}}{\text{Eficiência}_{\text{bomba}}} \quad (11)$$

$$W_{\text{compressor}} = \frac{W_{\text{compressor ideal}}}{\text{Eficiência}_{\text{compressor}}} \quad (12)$$

Em sistemas que contenham misturadores (ciclo Rankine Regenerativo), uma fração do fluído de trabalho é retirada na turbina, essa fração é calculada pela equação (13):

$$y = \frac{(H_{\text{saída misturador}} - H_{\text{saída condensador}} - W_{\text{bomba}})}{(H_{\text{entrada misturador}} - H_{\text{saída condensador}} - W_{\text{bomba}})} \quad (13)$$

No caso do ciclo combinado Brayton-Rankine, o compressor opera de forma isentrópica, a temperatura de saída do compressor ($T_{s \text{ comp}}$) é encontrada assumindo-se a hipótese do padrão a ar frio, na qual os calores específicos são constantes à temperatura ambiente e sua razão é constante e expressa por $k=1,4$ (ÇENGEL; BOLES, 2013). Com essas considerações, é possível chegar à equação (14). O mesmo processo se repete para a turbina, na qual ocorre uma expansão isentrópica:

$$\left(\frac{T_{s \text{ comp}}}{T_{e \text{ comp}}} \right) = \left(\frac{P_{s \text{ comp}}}{P_{e \text{ comp}}} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \left(\frac{P_{e \text{ turb}}}{P_{s \text{ turb}}} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \left(\frac{T_{e \text{ turb}}}{T_{s \text{ turb}}} \right) \quad (14)$$

Como no ciclo Combinado o calor fornecido à água para o ciclo de Rankine é fornecido pelo ciclo Brayton, a razão entre os fluxos de massa é dada pelo balanço de energia realizado no trocador de calor, dado pela equação (15):

$$y = \left(\frac{m_{vapor}}{m_{gás}} \right) = \left(\frac{h'_{entrada} - h'_{saída}}{h_{saída} - h_{entrada}} \right) \quad (15)$$

Com isso, o trabalho líquido do ciclo combinado ($W_{liq\ comb}$), é dado pela soma do trabalho da turbina a gás somado com o trabalho da turbina a vapor multiplicado pela razão de fluxos (y) como mostra a equação (16):

$$W_{liq\ comb} = y \times W_{turbina\ vapor} + W_{turbina\ gás} \quad (16)$$

A eficiência dos ciclos Rankine, Brayton e combinado Brayton Rankine pode ser calculada pelas equações (18-20):

$$\eta_{Rankine} = \left(\frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{Q_{caldeira}} \right) \quad (18)$$

$$\eta_{Brayton} = \left(\frac{W_{turbina} - W_{compressor}}{Q_{câmara\ de\ combustão}} \right) \quad (19)$$

$$\eta_{Combinado} = \left(\frac{W_{liq\ comb}}{Q_{câmara\ de\ combustão}} \right) \quad (20)$$

Ressaltando que em sistemas com mais de uma turbina (ciclo Rankine com Reaquecimento), ou mais de uma bomba, os respectivos valores devem ser somados para o cálculo da eficiência.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho de conclusão de curso consiste na realização da simulação de ciclos de potência realizada na plataforma Simulink presente no software MATLAB®.

3.1 Simulink

A simulação utilizando Simulink origina programas com blocos que geram uma aparência semelhante à de diagramas de fluxos.

Na simulação foram utilizados os seguintes blocos (MATHWORKS, 2019):

- *Constant* (Figura 6): Nesse bloco que são inseridos os dados de pressão, temperatura e eficiência;

Figura 6 Bloco *Constant*



Fonte: MATHWORKS (2019).

- *Add* ou *Subtract* (Figura 7): bloco que pode realizar as operações de soma ou subtração, dependendo da programação que for feita em suas configurações;

Figura 7 - Bloco *Add* or *Subtract*



Fonte: MATHWORKS (2019).

- *Divide* (Figura 8): bloco que realiza as operações de divisão;

Figura 8 - Bloco *Divide*



Fonte: MATHWORKS (2019).

- *Product* (Figura 9): bloco que realiza a operação de multiplicação;

Figura 9 - Bloco *Product*



Fonte: MATHWORKS (2019).

- *Mux* (Figura 10): bloco que combina os dados de entrada, em um vetor de saída. Utilizado porque a função XSteam aceita somente dados de entrada na forma de vetor;

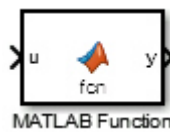
Figura 10 - Bloco *Mux*



Fonte: MATHWORKS (2019).

- *MATLAB Function* (Figura 11): permite a utilização de uma função escrita no MATLAB (função XSteam neste caso), no Simulink;

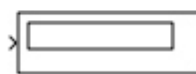
Figura 11 - Bloco *MATLAB Function*



Fonte: MATHWORKS (2019).

- *Display* (Figura 12): bloco que mostra o resultado de uma operação realizada.

Figura 12 - Bloco *Display*



Fonte: MATHWORKS (2019).

3.2 Validação dos programas

Para comprovar a validade dos programas criados, os mesmos foram construídos a partir de problemas enunciados na literatura (ÇENGEL; BOLES, 2013), que possuem valores testados e validados pelos autores.

Outro método utilizado para comprovar a funcionalidade dos programas criados, é a utilização, ao final do processo, de uma aba chamada “Balanço Geral de Energia”. Partindo-se do princípio da conservação de energia, toda a energia que entra no sistema, tem que ser igual a toda energia que sai do sistema, logo, subtraindo-se uma parcela da outra, o resultado deve ser zero.

3.2.1 Enunciado para o Ciclo de Rankine ideal

De acordo com Çengel e Boles (2013, p. 449)

EXEMPLO 10-1 O Ciclo de Rankine Simples Ideal

Considere uma usina de potência a vapor d'água que opera segundo o ciclo de Rankine simples ideal. O vapor entra na turbina a 3 MPa e 350°C e é condensado no condensador à pressão de 75kPa. Determine a eficiência térmica desse ciclo.

3.2.2 Enunciado para o Ciclo de Rankine ideal com efeitos da pressão e temperatura

De acordo com Çengel e Boles (2013, p. 454)

EXEMPLO 10-3 Efeito da Pressão e da Temperatura da Caldeira sobre a Eficiência

Considere uma usina a vapor d'água operando segundo o ciclo de Rankine ideal. Vapor entra na turbina a 3MPa e 350°C e é condensado no condensador à pressão de 10kPa. Determine (a) a eficiência térmica dessa usina, (b) a eficiência térmica se o vapor for superaquecido a 600°C, em vez de 350°C, e (c) a eficiência térmica se a pressão da caldeira for elevada até 15MPa enquanto a temperatura na entrada da turbina é mantida a 600°C.

3.2.3 Enunciado para o Ciclo de Rankine com Reaquecimento

De acordo com Çengel e Boles (2013, p. 463)

EXEMPLO 10-5 O Ciclo de Rankine Ideal com Reaquecimento

Considere uma usina a vapor d'água operando segundo o ciclo de Rankine ideal. Vapor entra na turbina a 3MPa e 350°C e é condensado no condensador à pressão de 10kPa. Se o conteúdo de umidade do vapor na saída da turbina de baixa pressão não deve exceder 10,4%, determine (a) a pressão na qual o vapor deve ser reaquecido e (b) a eficiência térmica do ciclo. Considere que o vapor é reaquecido até a mesma temperatura da entrada da turbina de alta pressão.

3.2.4 Enunciado para o Ciclo de Rankine Regenerativo

De acordo com Çengel e Boles (2013, p. 458)

EXEMPLO 10-4 O Ciclo de Rankine Regenerativo Ideal

Considere uma usina de potência a vapor d'água que opera segundo o ciclo de Rankine regenerativo ideal com um aquecedor de água de alimentação aberto. Vapor entra na turbina à 15MPa e 600°C e é condensado no condensador à pressão de 10kPa. Parte do vapor deixa a turbina a uma pressão de 1,2MPa e entra no aquecedor de água de alimentação aberto. Determine a fração de vapor extraída na turbina e a eficiência térmica do ciclo.

3.2.5 Enunciado para o Ciclo Combinado Brayton-Rankine

No caso do ciclo combinado Brayton-Rankine, para fins de construção do programa, tomou-se como exemplo o enunciado, segundo Çengel e Boles et al. (2013, p. 474) “EXEMPLO 10-9 Um Ciclo combinado Gás-Vapor”, porém os valores utilizados nas simulações foram escolhidos ao acaso, pois não há exercícios nas literaturas utilizadas neste trabalho que consideram um sistema ideal (eficiência de 100% para todos os equipamentos). Com isso, como critério de validação do sistema, foi utilizado o princípio da Primeira Lei da Termodinâmica; através de um balanço geral de energia em que a quantidade de energia aplicada no sistema é a mesma resultante ao final do processo (o balanço geral de energia é zero para todas as simulações).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso dos blocos do Simulink na construção e desenvolvimento das equações de balanço de massa e energia é ilustrado pela Figura 13, que demonstra como os blocos devem ser interligados para formar o sistema de equações. Na Figura 14 há um demonstrativo de como um programa, que corresponde a um ciclo de potência, é construído. A construção segue a mesma ordem da resolução de um problema feita de maneira manual, utilizando-se as equações dos balanços e as tabelas termodinâmicas.

4.1 Ciclo de Rankine Ideal

A Tabela 1 apresenta as propriedades consideradas para o Ciclo de Rankine Ideal, segundo Çengel e Boles et al. (2013, p. 449) “EXEMPLO 10-1”, e os resultados obtidos na simulação.

Tabela 1: Propriedades para o ciclo Rankine Ideal

Propriedade	Valor
Pressão de entrada na Turbina	30,0 bar
Temperatura de entrada na Turbina	350,0 °C
Pressão de saída na Turbina	0,75 bar
Eficiência Calculada	26,02%
Eficiência Literatura (ÇENGEL; BOLES, 2013)	26,00%
Erro	0,08%

Fonte: o autor

A Tabela 2 apresenta as propriedades consideradas para o Ciclo de Rankine ideal, considerando um estudo da influência da temperatura e pressão no rendimento do ciclo, segundo Çengel e Boles et al. (2013, p. 454) “EXEMPLO 10-3”, e os resultados obtidos.

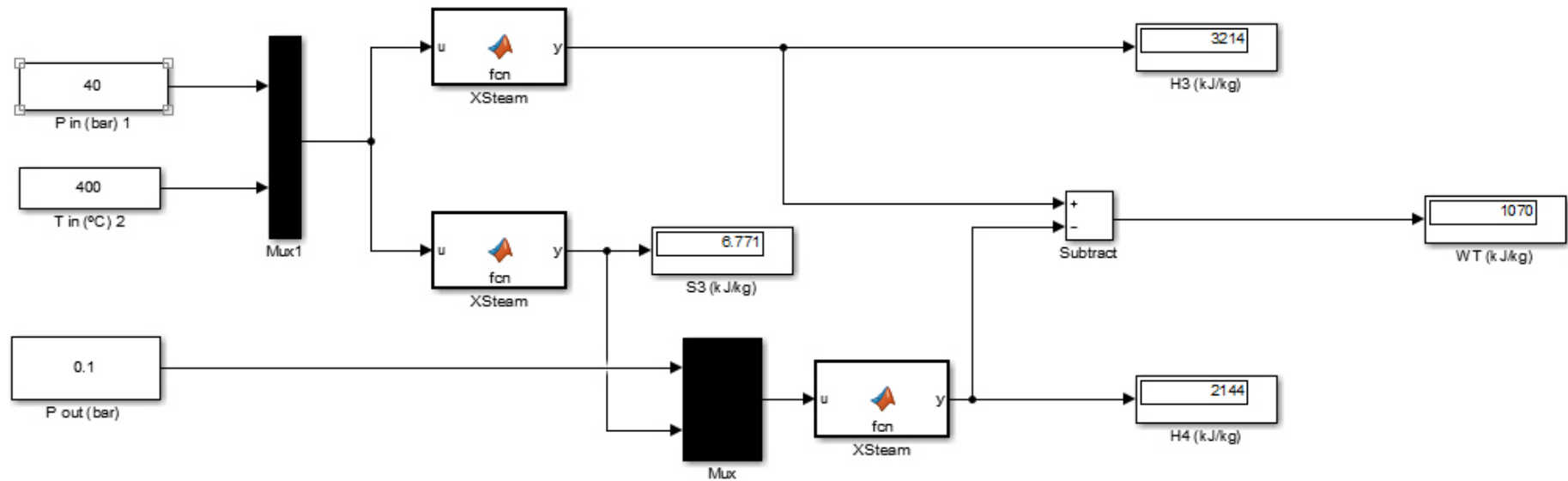
Tabela 2: Propriedades para o ciclo Rankine ideal – efeitos da pressão e temperatura

Propriedade	Valor
Pressão de entrada na Turbina	150,0 bar
Temperatura de entrada na Turbina	600,0 °C
Pressão de saída na Turbina	0,1 bar
Eficiência Calculada	43,03%
Eficiência Literatura (ÇENGEL; BOLES, 2013)	43,00%
Erro	0,07%

Fonte: o autor.

A Figura 15 apresenta o diagrama Simulink para o Ciclo de Rankine Ideal, utilizado nas simulações.

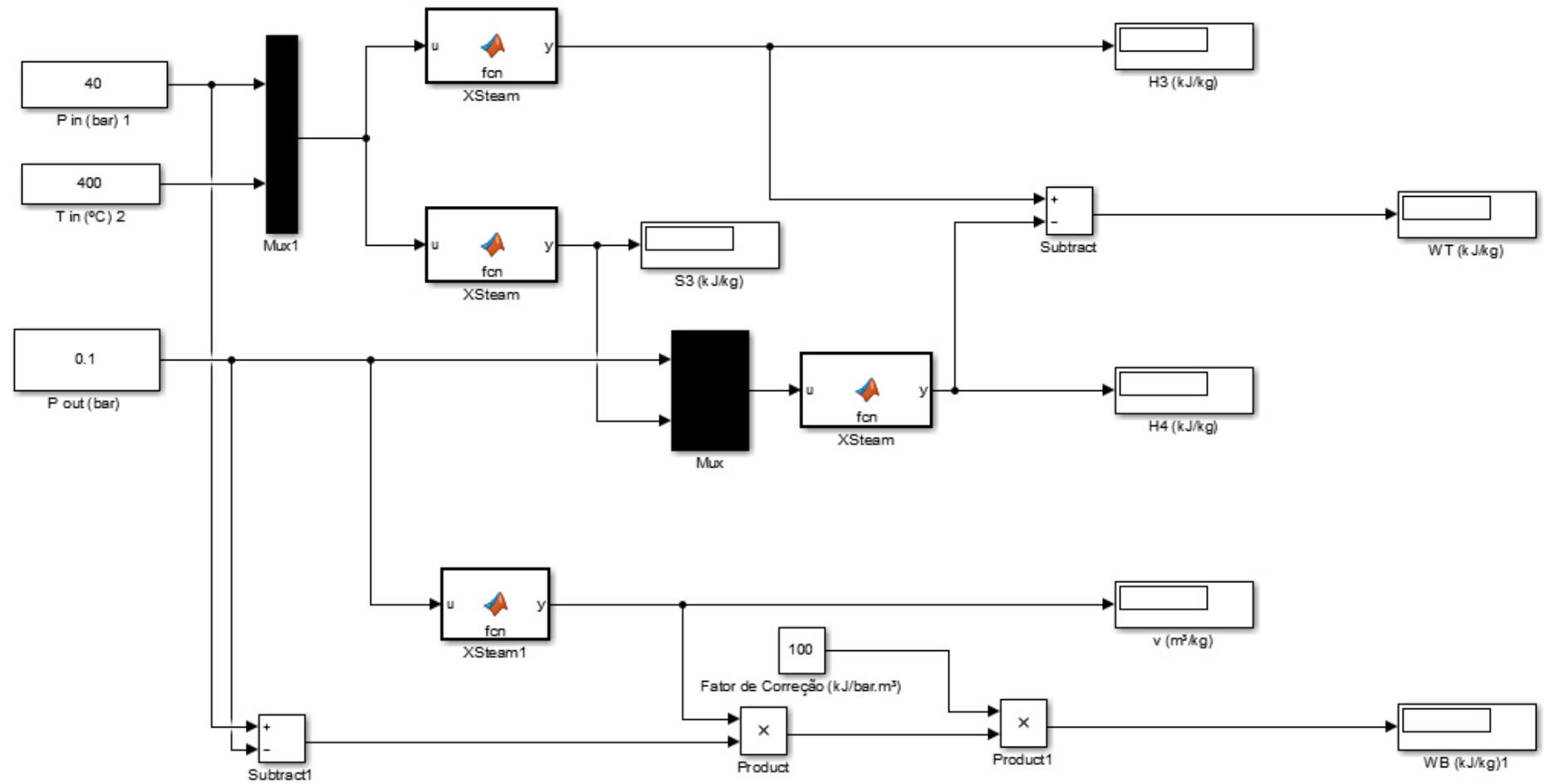
Figura 13 - Aplicação das Equações de balanço de massa e energia, através dos blocos do Simulink, para programação da Turbina



Fonte: o autor.

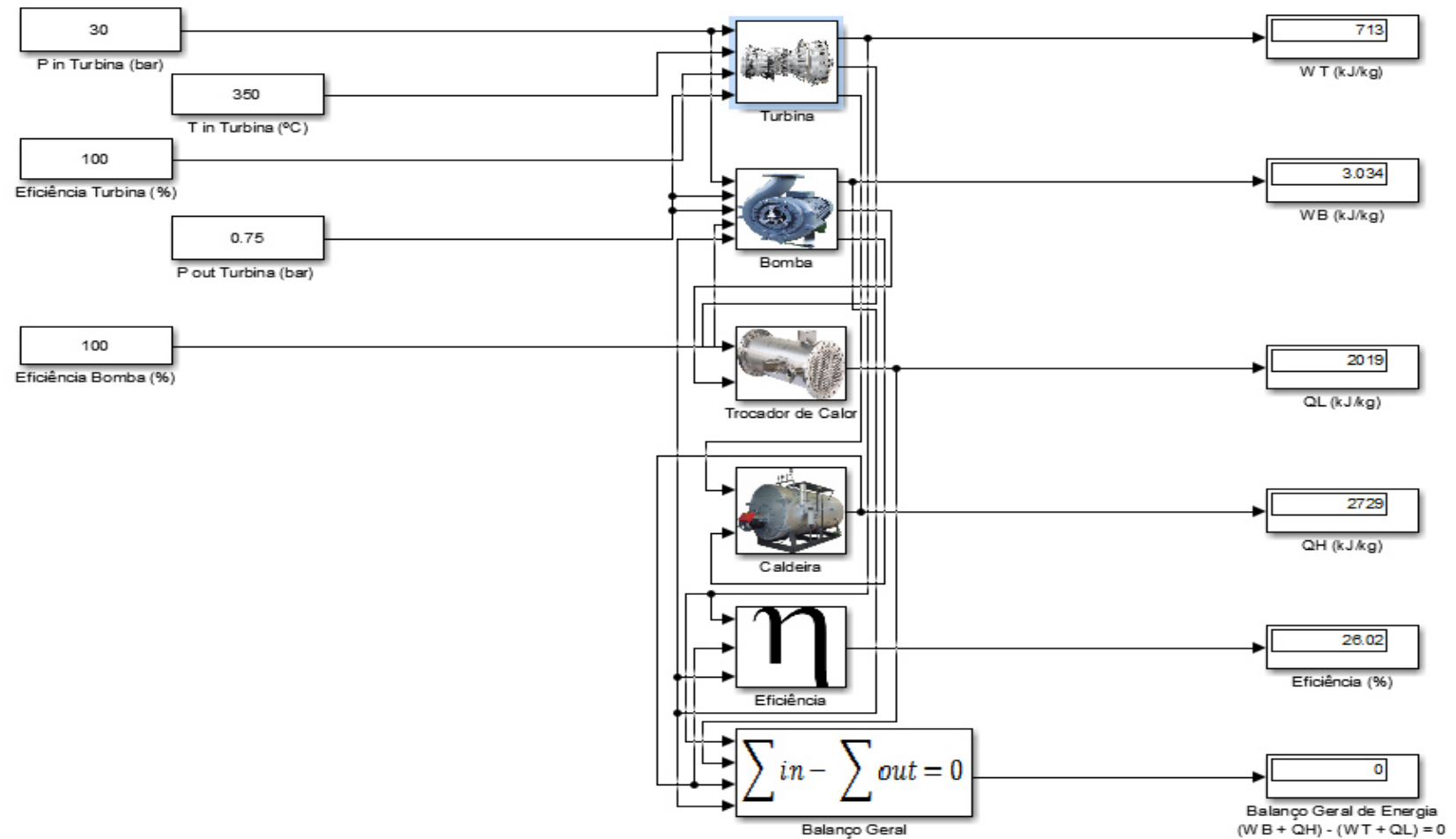
Como ilustrado na Figura 13, através dos valores de pressão “P in (bar)”, “P out (bar)” e temperatura “T in(°C)” inseridos pelo usuário, o bloco Mux os combina em formato vetorial, e esse vetor é chamado pela rotina XSteam no bloco MATLAB function, que retorna os valores de entalpia e entropia, utilizados nos balanços de energia, que, no caso da Figura 13, é realizado pelo bloco Subtract, que executa a operação de subtração das entalpias de saída e entrada, que corresponde ao trabalho realizado pela turbina.

Figura 14 - Construção de um ciclo de Rankine, etapas da Turbina + Bomba



Fonte: o autor.

Figura 15 - Diagrama SIMULINK para o ciclo de Rankine



Fonte: o autor.

Conforme ilustrado na Figura 15, os dados da Tabela 1 foram simulados no programa criado, e os resultados obtidos, como trabalho gerado pela turbina e consumido pela bomba, são mostrados à direita do diagrama Simulink, tal como a eficiência geral do ciclo e o balanço geral de energia, que foi nulo, comprovando a 2ª Lei da Termodinâmica. Erro experimental encontrado de 0,08%.

Conforme indicado na Tabela 2, é clara a influência da temperatura e pressão nos ciclos de potência a vapor. Ao aumentar-se esses valores, a eficiência do ciclo aumenta consideravelmente, em relação à situação descrita na Tabela 1. Para esta simulação, o erro experimental se mostrou menor ainda em relação à anterior.

4.2 Ciclo Rankine com Reaquecimento

A Tabela 3 apresenta as propriedades consideradas para o Ciclo de Rankine com Reaquecimento, segundo Çengel e Boles et al. (2013, p. 458) “EXEMPLO 10-4”, e os resultados obtidos na simulação.

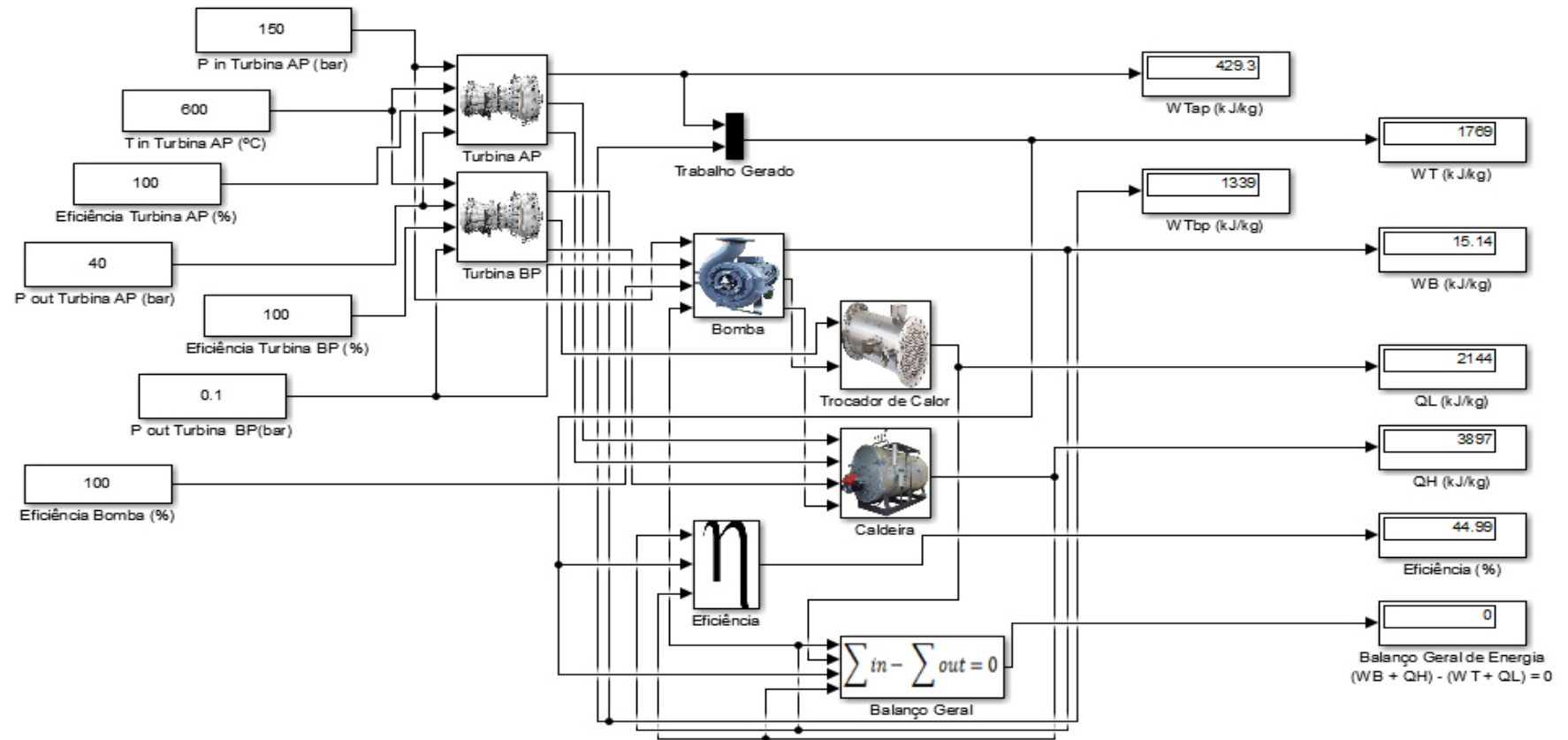
Tabela 3: Propriedades para o ciclo Rankine com Reaquecimento

Propriedade	Valor
Pressão de entrada na Turbina de Alta Pressão	150,0 bar
Temperatura de entrada na Turbina de Alta Pressão	600,0 °C
Pressão de saída na Turbina de Alta Pressão	40,0 bar
Pressão de saída na Turbina de Baixa Pressão	0,10 bar
Eficiência Calculada	44,99%
Eficiência Literatura (ÇENGEL; BOLES, 2013)	45,00%
Erro	0,02%

Fonte: o autor.

A Figura 16 apresenta o diagrama Simulink para o Ciclo de Rankine com reaquecimento, utilizado na simulação dos dados contidos na Tabela 3.

Figura 16 - Diagrama SIMULINK para o ciclo de Rankine com Reaquecimento



Fonte: o autor

Conforme observado na Figura 16, a simulação do ciclo de Rankine com reaquecimento foi bem-sucedida, com um balanço geral de energia nulo e com erro experimental (Tabela 3) extremamente baixo.

4.3 Ciclo Rankine Regenerativo

A Tabela 4 apresenta as propriedades consideradas para o Ciclo de Rankine Regenerativo, segundo Çengel e Boles et al. (2013, p. 463) “EXEMPLO 10-5”, e os resultados obtidos na simulação.

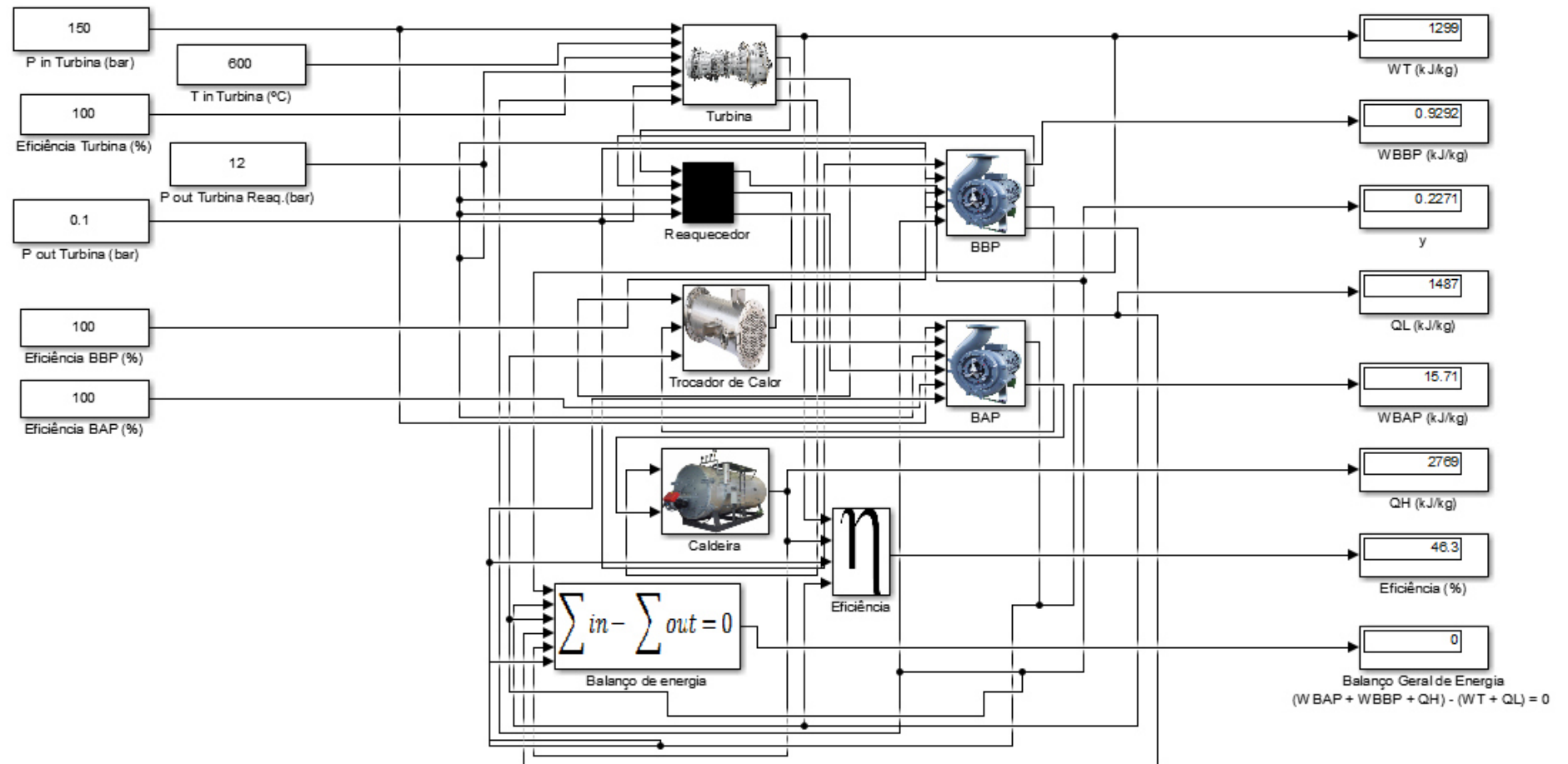
Tabela 4: Propriedades para o ciclo Rankine Regenerativo

Propriedade	Valor
Pressão de entrada na Turbina	150,0 bar
Temperatura de entrada na Turbina	600,0 °C
Pressão de saída ao misturador	12,0 bar
Pressão de saída na Turbina	0,10 bar
Eficiência Calculada	46,30%
Eficiência Literatura (Çengel; Boles, 2013)	46,30%
Erro	0,00%

Fonte: o autor

A Figura 17 apresenta o diagrama Simulink para o Ciclo de Rankine com reaquecimento, utilizado na simulação dos dados contidos na Tabela 4.

Figura 17 - Diagrama SIMULINK para o Ciclo de Rankine Regenerativo



Fonte: o autor

Apesar da maior complexidade de cálculos, o diagrama Simulink do ciclo de Rankine Regenerativo, ilustrado na Figura 17, apresentou balanço geral de energia e erro experimental nulos na simulação dos dados da Tabela 4, além de demonstrar que essa configuração apresenta maior eficiência em relação às anteriores citadas.

4.4 Ciclo Combinado Brayton-Rankine

A Tabela 5 apresenta as propriedades consideradas para o Ciclo Combinado Brayton-Rankine, e os resultados obtidos na simulação. Tais propriedades foram escolhidas ao acaso, pois não há exemplos de ciclos combinados Brayton-Rankine ideais nas literaturas consideradas neste trabalho.

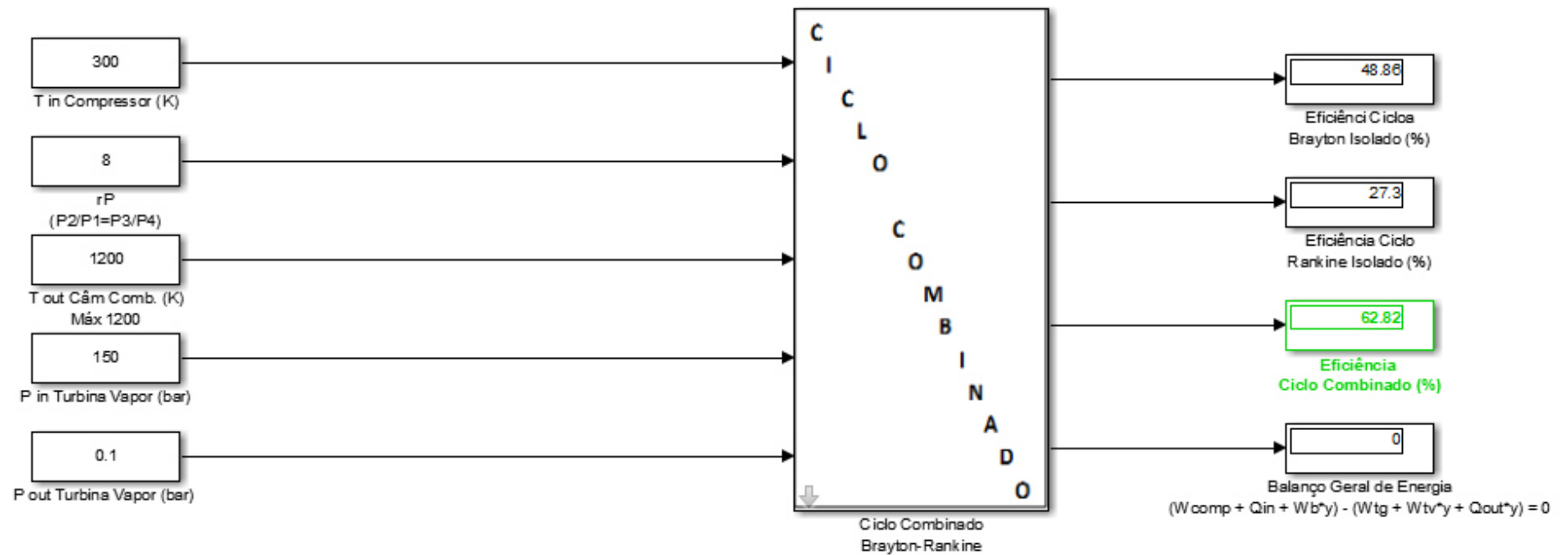
Tabela 5: Propriedades para o ciclo combinado Brayton-Rankine

Propriedade	Valor
Temperatura de entrada no Compressor	300,00 K
Razão de Pressões (rP)	8,00
Temperatura de saída da Câmara de Combustão	1200,00 K
Pressão de Entrada na Turbina à Vapor	150 bar
Pressão de Saída na Turbina à Vapor	0,1 bar
Eficiência do ciclo Brayton isolado	48,86%
Eficiência do ciclo Rankine isolado	27,30%
Eficiência do ciclo Combinado	62,82%
Balanço Geral de Energia	0

Fonte: o autor

A Figura 18 apresenta o diagrama Simulink para o Ciclo Combinado Brayton-Rankine, utilizado na simulação dos dados contidos na Tabela 5.

Figura 18 - Diagrama SIMULINK para o Ciclo Combinado Brayton-Rankine



Fonte: o autor

Observações: para o Ciclo Combinado, optou-se pela criação de um sistema para exibição final do programa, porque ele ficou muito extenso. Mas a lógica envolvida é a mesma dos outros, basta o usuário expandir o sistema e poderá ver todos os blocos que o compõe.

É possível observar na Figura 18 e na Tabela 5, que para esse sistema o balanço geral de energia é nulo, validando a simulação, e também constatar que a eficiência do ciclo combinado é muito maior que as eficiências individuais dos ciclos que o compõe. Essa configuração apresenta o maior rendimento em comparação a todas as outras.

Para fins de testes, outras simulações, considerando também a eficiência hipotéticas dos equipamentos (condição “real”), foram realizadas obtendo-se sempre um balanço geral de energia nulo, assegurando que os resultados de eficiência são verdadeiros.

5 CONCLUSÃO

Baseando-se nos fatos de que os resultados obtidos nesse trabalho, quando comparados a literatura, apresentaram erros experimentais extremamente baixos, como 0,02% para o ciclo de Rankine com reaquecimento, ou nulo no caso do ciclo de Rankine Regenerativo, pôde-se comprovar que a predição das propriedades termodinâmicas realizada pelo XSteam e pela rotina de interpolação dos valores contidos na literatura é eficiente, e que para todas as simulações o balanço geral de energia dos sistemas foi nulo, indicando que os programas criados são válidos e atendem aos princípios da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica.

Os pequenos erros encontrados podem ser explicados por possíveis arredondamentos realizados pelos autores da literatura, pois os cálculos das propriedades termodinâmicas envolvem diversas operações de interpolação de dados, normalmente com resultados seguidos de várias casas decimais, que são consideradas nos cálculos do Simulink.

O uso da ferramenta Simulink se mostrou uma alternativa eficaz na modelagem e simulação de problemas da Termodinâmica, e o fato desta ferramenta apresentar uma interface gráfica simples e intuitiva, auxilia que os usuários, até mesmo menos experientes, consigam utilizar e entender os programas com facilidade, podendo até mesmo fazer suas próprias modificações, a fim de facilitar a utilização.

REFERÊNCIAS

- AHMADI M.H.; NAZARI M.A.; SADEGHZADEH M.; POURFAYAZ F.; GHAZVINI M.; MING T.; MEYER, J.P.; AHMADI S.M.. Thermodynamic and economic analysis of performance evaluation of all the thermal power plants: A review. **Energy Science & Engineering**, v. 7, n. 1, p. 30-65, 2019.
- CASTILLO, P.F.A.; FREIRE, N. Correlação das propriedades termodinâmicas da água e simulação de ciclos de potência a vapor - Rankine. **Revista de Gestão & Tecnologia**, [S.l.], v. 3, n. 2, 2015.
- ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. **Termodinâmica**. Porto Alegre: McGraw Hill Publishers, 2013.
- DAI, X.; SHI, L.; QIAN, W. Review of the Working Fluid Thermal Stability for Organic Rankine Cycles. **Journal of Thermal Science**, pp. 1-11, 2019.
- KUMAR, G. ;MOHAN, R. Rankine Cycle Coupled with Heliostat Solar Receiver: A Review. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 6, n. 7, pp. 3533-3539, 2019.
- LIU, W.; XU, X.; CHEN, F.; LIU, Y.; LI, S.; LIU, L.; CHEN, Y. A review of research on the closed thermodynamic cycles of ocean thermal energy conversion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 109581, 2019.
- MORAN; M.J.; SHAPIRO H.N.; BOETTNER, D.D.; BAILEY, M.B. **Principles of Engineering Thermodynamics**, 7th edition, John Wiley & Sons Inc., 2012.
- MATHWORKS. **Block libraries: blocks that represent equations and modeling components**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/simulink/block-libraries.html>. Acesso em: 25 fev. 2019.
- MATSUMOTO, E.Y. **Simulink 5 – Fundamentos**. 2.ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.
- REYNOLDS, W. C. **Thermodynamic Properties in SI**, Department of Mechanical Engineering, 1979.

SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOTT, M.M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora, 2007.

VAN WYLEN, G.J.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

WALES, C.; TIERNEY, M.; PAVIER, M., FLEWITT, P. E. Reducing steam transport pipe temperatures in power plants. **Energy**, v. 183, pp. 127-141, 2019.

WISER, W.H. **Energy Resources: Occurrence, Production, Conversion, Use**. New York: Springer-Verlag, 2000..

APÊNDICE A - CÓDIGOS DOS BLOCOS “MATLAB FUNCTION”

Os dados de entrada para o bloco de função precisam estar na forma vetorial, portanto utiliza-se o bloco “Mux” para converter dois valores de entrada em um vetor de saída. No caso da bomba, como o único dado de entrada é a pressão, não há necessidade do uso do bloco “Mux”.

Turbina à vapor:

-Entalpia a partir da temperatura e pressão de entrada:

```
function y = fcn(u)

%#codegen

% double P1,T1;

P1 = u(1);

T1 = u(2);

% fprintf('%f %f %f %f\n', P1,T1,P2,ef);

coder.extrinsic('XSteam');

y = coder.nullcopy(zeros(size(P1)));

y = coder.nullcopy(zeros(size(T1)));

y = XSteam('h_pT',P1,T1);
```

-Entropia a partir da temperatura e pressão de entrada:

```
function y = fcn(u)

%#codegen

% double P1,T1;

P1 = u(1);

T1 = u(2);
```

```

coder.extrinsic('XSteam');

y = coder.nullcopy(zeros(size(P1)));

y = coder.nullcopy(zeros(size(T1)));

y = XSteam('s_pT',P1,T1);

```

-Entalpia a partir da pressão e entropia de entrada:

```

function y = fcn(u)

%#codegen

% double P1,T1;

P2 = u(1);

S3 = u(2);

coder.extrinsic('XSteam');

y = coder.nullcopy(zeros(size(P2)));

y = coder.nullcopy(zeros(size(S3)));

y = XSteam('h_ps',P2,S3);

```

Bomba

-Volume específico (líquido saturado) a partir da pressão:

```

function y = fcn(u)

%#codegen

coder.extrinsic('XSteam');

y = coder.nullcopy(zeros(size(u)));

y=XSteam('vL_p',u);

```

-Entalpia (líquido saturado) a partir da pressão:

```
function y = fcn(u)

%#codegen

coder.extrinsic('XSteam');

y = coder.nullcopy(zeros(size(u)));

y=XSteam('hL_p',u);
```

Equipamentos Ciclo Brayton

-Entropia a partir da temperatura de entrada:

```
function y = fcn(u)

%#codegen

coder.extrinsic('airProp');

y = coder.nullcopy(zeros(size(u)));

y=airProp(u,'h');
```

Os demais equipamentos utilizam os valores de entalpia obtidos das turbinas e bombas, e os cálculos são feitos através da manipulação de blocos de operações matemáticas simples.