

Trabalho Termoelétrica

Arthur Pimenta de Oliveira
Danrlei Diegues de Oliveira

26 de outubro de 2018

1 Resumo

Quando falamos de usinas térmicas, já ligamos a ciclos combinados que integram o ciclo da turbina a gás e o ciclo da turbina a vapor, de modo que a energia térmica excedente da turbina a gás é utilizada para vaporizar a água e gerar vapor de alta pressão, onde a turbina do ciclo a vapor é impulsionada. Dentro desse contexto, o trabalho visa modelar e analisar dentro desse ciclo combinado, gás e vapor, o desempenho e resultados tirados durante todo o processo. Para todas as nossas aplicações no computador, utilizamos o Python como linguagem de programação.

2 Introdução

O racionamento de energia elétrica não foi a primeira crise no setor elétrico, sendo que ocorreram anteriormente outras crises no Brasil e em outros países. A causa do déficit, que gerou o racionamento, foi que o crescimento do parque gerador brasileiro não acompanhou o crescimento do consumo da forma adequada. O racionamento produziu impacto no consumo de energia elétrica de forma singular, provocando redução no consumo brasileiro em torno de 24 %, influenciando até onde não houve racionamento e mantendo efeitos no consumo mesmo após o seu término. Foram calculadas as consequências do racionamento no consumo de energia elétrica por região, por setor, na demanda e em casos específicos. Os métodos de cálculos foram empregados considerando o crescimento no consumo em 2001, no período pré-crise de energia levando em consideração a sazonalidade dos períodos. As influências do racionamento não ficaram restritas ao consumo de energia elétrica, tendo efeitos no setor elétrico, na indústria, no comércio, na economia, na política nacional e na vida das pessoas em geral.[1]

Dentro desse cenário. No Brasil, utiliza-se a energia termelétrica de forma estratégica, pois esta pode ser produzida em uma quantidade constante durante o ano inteiro, diferentemente das hidrelétricas, as quais possuem a produção dependente do nível de rios. Mais especificamente, as termelétricas complementam a matriz energética das hidrelétricas, sendo acionadas predominantemente quando há necessidade, como em períodos de estiagem.[3]

Este artigo tem como objetivo descrever e analisar o processo de um ciclo combinado, utilizando como base os conceitos da teoria da termodinâmica. Avaliando os

ciclos a gás e vapor.

A avaliação aqui proposta parte primeiro da modelagem dos dois sistemas (gás e vapor), em que seguimos com a validação de cada ponto entre cada componente do ciclo, tendo como saídas valores de volume específico, pressão, temperatura, entalpia e entropia. Onde essas características são utilizadas para encontrarmos os valores de calor e trabalho para as turbinas, compressores, bombas, caldeira e condensador. Além de retirarmos o diagrama T-s para a água e o ar, finalizamos com indicação das vazões mássicas, cálculos dos rendimentos energéticos e uma avaliação da relação de compressão no ciclo a gás.

3 Definição de Parâmetros

Nosso estudo será em base aos dois ciclos das figuras 1 e 2, em um ciclo 2x1.

3.1 Ciclo a Gás

Ar do ambiente, na entrada do ciclo a gás, se encontra à 30C e 1,013 bar Pressão de 30 bar após o compressor (C); Temperatura de 1300C na entrada da turbina a gás (TG); Temperatura de 750C na saída da queima suplementar (QS); Rendimentos isentropicos de 86% para o compressor (C) e 90% para a turbina a gás (T G); Vazão mássica de ar de 450 kg/s.

3.2 Ciclo a Vapor

Estado do vapor na entrada da turbina referente a 550C e 125 bar; Pressões de 45 bar, 25 bar, 7 bar, 0,3 bar nas exaustões ~ de HP1, HP2, LP1 e LP2, respectivamente; Líquido saturado na saída do condensador; Pressão de 10 bar na saída da bomba do condensador (B1); líquido

Figure 1: Ciclo a Gás

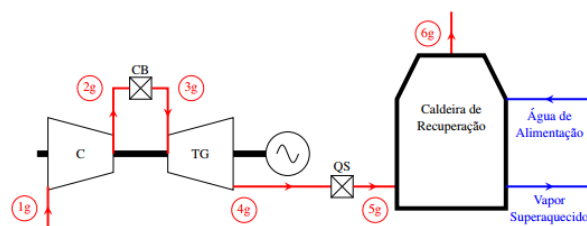
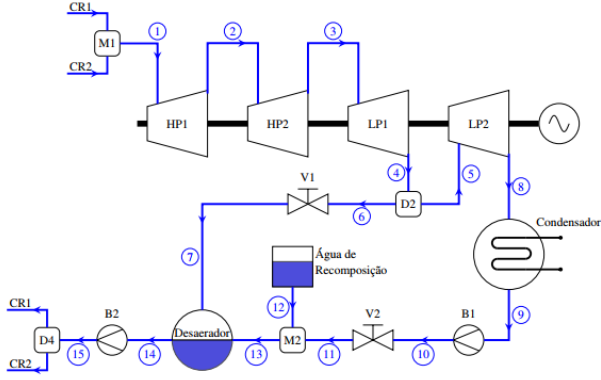


Figure 2: Ciclo a Vapor



saturado a 2 bar na saída do desaerador; Pressão de 125 bar na saída da bomba do desaerador (B2); Água de recomposição a 30 C e 2 bar; Rendimento isentropico de 90% para todos os estágios da turbina a vapor; Rendimento isentropico de 85% para as bombas; Vazão mássica de vapor na turbina de 200 kg/s; Propriedades intensivas se conservam em todos os misturadores e divisores de fluxo de fluido de trabalho.

4 Modelagem

Para modelar os sistemas devemos analisar cada componente separadamente, de forma a analisar o comportamento do fluido ao passar por ele. Essa análise é feita pela transferência de calor e realização de trabalho, onde é possível através do estudo pela primeira lei da termodinâmica.

4.1 Primeira Lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica é uma versão da lei de conservação de energia. Onde temos três parcelas principais que compõem a equação de equilíbrio do corpo em estudo, sendo elas: energia interna, trabalho e calor. Segue a equação:

$$Q = \Delta U + W \quad (1)$$

Em que a energia total do corpo pode ser expressa em:

$$\Delta U = E_{cinetica} + E_{potencial} + E_{interna} \quad (2)$$

Logo,

$$Q - W = (h_x - h_y) + \frac{V_x^2 - V_y^2}{2} + g \cdot (Z_x - Z_y) \quad (3)$$

Partindo desse ponto podemos começar a modelagem da primeira lei para cada componente do ciclo combinado. Dentro do ciclo a gás temos o compressor, o combustor, a turbina, a queima suplementar e a caldeira de recuperação. Partindo também que consideramos que a energia cinética e energia potencial não se alteram nem antes nem depois para cada componente do processo. E que por conhecimento prévio só há trabalho recebido ou

realizado no processo do compressor e turbina. Em contrapartida, temos que só teremos perda ou recebimento de calor nos processos do combustor, queima suplementar e na caldeira de recuperação. Para cada componente citado então temos:

4.2 Ciclo a Gás

4.2.1 Compressor

É um equipamento industrial concebido para aumentar a pressão de um fluido em estado gasoso ar, vapor de água, hidrogênio. O trabalho realizado por ele é representado pela equação (4).

$$\frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_{1_g}} = h_{2_g} - h_{1_g} \quad (4)$$

4.2.2 Combustor

Também conhecido como queimador. Neste sistema ele alimenta um motor de turbina a gás e é alimentado com ar de alta pressão pelo sistema de compressão. Tem a intenção de elevar a temperatura do sistema e o calor fornecido por ele na planta é dado pela equação (5).

$$\frac{\dot{Q}_{CB}}{\dot{m}_{2_g}} = h_{3_g} - h_{2_g} \quad (5)$$

Sabendo que,

$$m_{1_g} = m_{2_g} \quad (6)$$

4.2.3 Turbina a Gás

Turbinas a gás são máquinas motrizes de combustão interna que utilizam o ar como fluido de trabalho, utilizadas para acionamento de outra máquina rotativa, a qual produz trabalho útil[4]. A turbina a gás realiza um trabalho dado pela equação (7).

$$\frac{\dot{W}_{TG}}{\dot{m}_{3_g}} = h_{3_g} - h_{4_g} \quad (7)$$

4.2.4 Queima Suplementar

A queima suplementar tem por objetivo aumentar a temperatura do gás de escape. Isso proporciona uma adequação à demanda, em que seja possível produzir mais ou menos vapor conforme a necessidade da usina[2]. A turbina a gás realiza um trabalho dado pela equação (8).

$$\frac{\dot{Q}_{QS}}{\dot{m}_{4_g}} = h_{5_g} - h_{4_g} \quad (8)$$

4.2.5 Caldeira de Recuperação

A caldeira de recuperação é o componente que proporciona a troca de calor do sistema com o meio externo, sem haver troca de fluidos. Esse calor pode ser calculado pela reação da equação (9).

$$\frac{\dot{Q}_{CR}}{\dot{m}_{5_g}} = h_{6_g} - h_{5_g} \quad (9)$$

4.3 Ciclo a Vapor

4.3.1 Misturador

O misturador é responsável por somar os fluidos em determinado ponto do sistema onde são instalados. Não interferem na transferência de energia do sistema. E o misturador M1 pode ser modelado pela equação (10).

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 = \dot{m}_{CR1} \cdot h_{CR1} + \dot{m}_{CR2} \cdot h_{CR2} \quad (10)$$

Sendo que,

$$\dot{h}_1 = \dot{h}_{CR1} = \dot{h}_{CR2} \quad (11)$$

pois a entalpia é propriedade intensiva.

Já o misturador M2 recebe uma parcela de massa da água de recomposição e outra parcela do sistema principal. Sua modelagem é dado pela equação (15)

$$\dot{m}_{13} \cdot h_{13} = \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_{12} \cdot h_{12} \quad (12)$$

$$\dot{h}_{13} = \dot{h}_1 = \dot{h}_{12} \quad (13)$$

4.3.2 Turbina

A turbina a vapor é uma máquina térmica que aproveita a energia térmica do vapor sob pressão, neste caso, gerado por uma caldeira, convertendo-a em trabalho mecânico útil através de uma transformação de dilatação térmica. Onde cada parte dela pode ser representada por HP1, HP2, LP1 e LP2. Modelados pelas fórmulas (14),(15),(16) e (17) respectivamente.

$$\dot{W}_{HP1} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) \quad (14)$$

$$\dot{W}_{HP2} = \dot{m}_2 \cdot (h_2 - h_3) \quad (15)$$

$$\dot{W}_{LP1} = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_4) \quad (16)$$

$$\dot{W}_{LP2} = \dot{m}_5 \cdot (h_5 - h_8) \quad (17)$$

Dentro desse ciclo, sabemos que a vazão mássicas são as mesmas nos pontos (1), (2), (3) e (4) da figura 1, assim:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (18)$$

4.3.3 Distribuidor

O distribuidor faz a função inversa do misturador, neste caso ele é responsável por dividir a massa em um determinado ponto, não necessariamente de forma igualitária. Neste caso temos dois distribuidores D2 e D4. O balanço energético a volume de controle é dado pelas equações (19) e (21)

$$\dot{m}_4 \cdot h_4 = \dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (19)$$

Sendo que,

$$h_4 = h_5 = h_6 \quad (20)$$

$$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} = \dot{m}_{CR1} \cdot h_{15} + \dot{m}_{CR2} \cdot h_{15} \quad (21)$$

4.3.4 Válvula

As válvulas são dispositivos de estrangulamento que promovem a redução da pressão na linha pela qual o fluido escoar. Dessa forma, o balanço energético a um volume de controle envolvendo as válvulas, V1 e V2, são dados pelas equações (22) e (24), respectivamente.

$$\dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_7) = 0 \quad (22)$$

$$h_6 = h_7, (P_7 < P_6) \quad (23)$$

$$\dot{m}_{10} \cdot (h_{10} - h_{11}) = 0 \quad (24)$$

$$h_{10} = h_{11}, (P_{11} < P_{10}) \quad (25)$$

4.3.5 Condensador

O condensador que é modelado pela equação (26) é responsável, neste processo, por transformar o vapor aquecido em líquido, para que ele seja bombeado pela bomba B1, medelada pela equação (21).

$$\dot{Q}_{CD} = \dot{m}_8 \cdot (h_8 - h_9) \quad (26)$$

4.3.6 Desareador

O desareador armazena a água já pronta para a alimentação da caldeira. Sua modelagem vai pela equação (27)

$$\dot{m}_{14} \cdot h_{14} = \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_{13} \cdot h_{13} \quad (27)$$

4.3.7 Bomba

A bomba, sendo a M1 modelada por (28), tem como objetivo final aumentar a pressão do fluido.

$$\dot{W}_{B1} = \dot{m}_{9g} \cdot (h_{10} - h_9) \quad (28)$$

A bomba M2 modelada por (29), injeta o fluido no distribuidor D4 para a saída do ciclo a vapor, com destino ao ciclo a gás, onde passará pela caldeira de recuperação onde se reinicia o ciclo.

$$\dot{W}_{B2} = \dot{m}_{14} \cdot (h_{15} - h_{14}) \quad (29)$$

5 Vazões Mássicas

Neste volume de controle, temos um sistema que se encontra em regime permanente, logo não há variação de massa presente no sistema. Logo, não há perda da quantidade de fluido circulando por ele. Com isso vamos descrever o comportamento da vazão mássica em cada ponto do sistema, primeiro no ciclo a gás e posteriormente no ciclo a vapor.

5.1 Ciclo a Gás

Neste ciclo não temos divisão em nenhum dos estados em estudo. Sendo que a massa de ar que entra no primeiro estado, é a mesma que sai no último estado. Portanto a vazão mássica nesse ciclo, é representada pela equação (30)

$$\dot{m}_{1_g} = \dot{m}_{2_g} = \dot{m}_{3_g} = \dot{m}_{4_g} = \dot{m}_{5_g} = \dot{m}_{6_g} \quad (30)$$

Table 1: Vazão mássica do Ciclo a Gás

Linha	Vazão mássica (kg/s)
1	450
2	450
3	450
4	450
5	450
6	450

5.2 Ciclo a Vapor

No ciclo a vapor já temos um cenário diferente, onde temos pontos onde existe extração de vazão. Devemos fazer balanço de massa para representar a vazão em cada estado, notamos isso nas equações (31) a (37)

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (31)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \quad (32)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (33)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (34)$$

$$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (35)$$

$$\dot{m}_7 + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} \quad (36)$$

$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} \quad (37)$$

Tendo toda essa análise das vazões, podemos representar na tabela 2 as vazões de cada estado.

6 Parâmetros dos Estados

Partimos para encontrar os valores dos parâmetros de cada estado dos ciclos, a partir dos dados inicialmente fornecidos. Junto com as vazões mássicas. Então temos os resultados abaixo.

Table 2: Vazão mássica do Ciclo a Vapor

Linha	Vazão mássica (kg/s)
1	200.00
2	200.00
3	200.00
4	200.00
5	182.86
6	17.1362
7	17.1362
8	182.86
9	182.86
10	182.86
11	182.86
12	0
13	182.86
14	199.99
15	199.99

Table 3: Parâmetros do Ciclo a Gas

E	P (Bar)	T (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (KJ/Kg * K)
1	1.013	30.000	0.8588	429.4681	3.8973
2	30.000	576.7903	0.0822	1004.7554	3.9964
3	30.000	1300.000	0.1515	1853.7792	4.7158
4	1.013	496.1595	2.1807	914.7972	4.8607
5	1.013	750.0000	2.9002	1198.9819	5.1796
6	1.013	141.3583	0.1106	541.9804	4.2133

6.1 Ciclo a Gás

Os parâmetros retirados do ciclo a gás podem ser encontrados na tabela 3.

Para o cálculo do h_{6_g} foi preciso fazer o balanço energético da caldeira de recuperação, dado pela equação 38

$$\dot{m}_g \cdot (h_{6_g} - h_{5_g}) = \dot{m}_v \cdot (h_{15} - h_1) \quad (38)$$

6.2 Ciclo a Vapor

Para o ciclo a vapor, podemos ver os parâmetros na tabela 4.

7 Diagrama T-s

Com o auxílio do Python foram localizados cada estado nos seus respectivos diagramas T-s para ar e água. O ciclo a gás pode ser visto pela figura 3, onde temos os componentes descritos na legenda e para o ciclo a vapor, podemos ver na figura 4

8 Trabalho e Transferência de Calor

O trabalho e calor em cada componente utilizamos mais uma vez o Python como linguagem de programação, onde obtivemos os valores nas tabelas abaixo, para cada

Figure 3: Ciclo a Gás

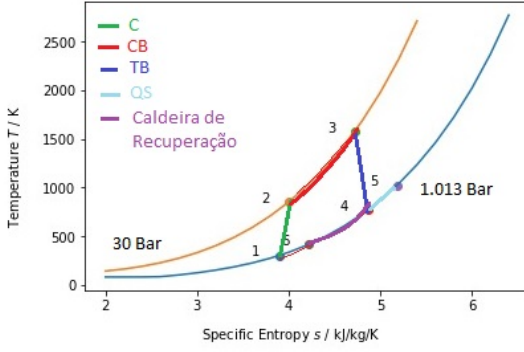
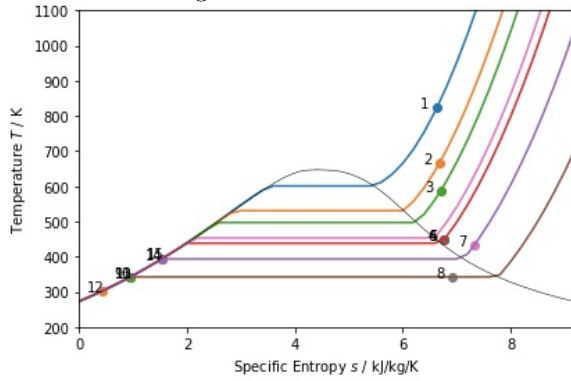


Figure 4: Ciclo a Gás



ciclo. Podemos notar na tabela 5 para o ciclo a gás e na tabela 6 para o ciclo a vapor.

9 Rendimento Energético

O rendimento é o principal parâmetro que caracteriza um ciclo termodinâmico e é definido como o trabalho obtido dividido pelo calor gasto no processo, em um mesmo tempo de ciclo completo, se o processo é contínuo. De forma geral, a eficiência térmica de um ciclo de potência é dado pela equação (39)

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{entra}} \quad (39)$$

Com isso o rendimento energético do ciclo a gás pode ser calculado pela relação do trabalho realizado pela turbina a gás menos o trabalho do compressor. O calor fornecido ao ciclo a gás é dado pelo combustor. A equação (40) mostra o cálculo do rendimento energético para o ciclo a gás.

$$\eta = \frac{W_{TG} - W_C}{Q_{CB}} \quad (40)$$

O rendimento energético do ciclo a vapor pode ser calculado através do somatório do trabalho realizado por todas as turbinas, menos o o trabalho da bomba, dividido pelo calor da caldeira de recuperação multiplicado por dois. Equacionado pela equação (43).

$$W_T = W_{HP1} + W_{HP2} + W_{LP1} + W_{LP2} \quad (41)$$

$$W_B = W_{B1} + W_{B2} \quad (42)$$

$$\eta V = \frac{W_T - W_B}{2Q_{CR}} \quad (43)$$

O rendimento do ciclo combinado pode ser visto pela equação (44).

$$\eta = \frac{W_T + 2W_{TG} - W_B - 2W_C}{2(Q_{CR} + Q_{QS})} \quad (44)$$

A partir das fórmulas, temos os rendimentos do ciclo a gás, a vapor e combinado na tabela 7

10 Conclusão

Pela modelagem que foi feita de ambos os ciclos pudemos fazer um estudo das vazões mássicas, dos trabalhos e trocas de calor em cada dispositivo. Com isso pudemos traçar o diagrama T-s, o qual é útil para análise mais estratégica dos ciclos separadamente.

A partir da análise dos ciclos e todo os estudos, podemos ter como parâmetro os rendimentos separadamente e o rendimento combinado. Pudemos observar que o ciclo se torna positivo pelos valores e que quando combinados, o rendimento se torna maior.

Este tipo de estudo se torna muito importante para a formação de um engenheiro, onde o capacita para a análise de processos termodinâmicos. Dando ao profissional a visão técnica para desenvolver trabalho na área de atuação.

References

- [1] Cesar Endrigo Alves Bardelin. Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica. 2004.
- [2] Diego Luís Izidoro. Recuperação de calor residual de baixa qualidade em usinas termelétricas de ciclo combinado. 2016.
- [3] Maria Thereza da Silva Lopes Lima and Marina Corrêa de Souza. Discorrendo sobre o uso das termelétricas no brasil. *Ciência e Natura*, 37(2):17–23, 2015.
- [4] Martin Wall, Richard Lee, and Simon Frost. Off-shore gas turbines (and major driven equipment) integrity and inspection guidance notes. *Colegate, Norwich: Crown*, 2006.

Table 4: Parâmetros do Ciclo a Vapor

E	P (Bar)	T (°C)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg * K)
1	125	550.00	0.0280	3476.5146	6.6317
2	45.0	382.6201	0.0639	3187.7826	6.6804
3	25.0	314.9038	0.1022	3045.3047	6.7074
4	7.0	176.5299	0.2820	2791.1536	6.7711
5	7.0	176.5299	0.2820	2791.1536	6.7711
6	7.0	176.5299	0.2820	2791.1536	6.7711
7	2.0	160.7294	0.9860	2791.1536	7.3325
8	0.3	69.0952	4.5787	2334.2936	6.9194
9	0.3	69.0952	0.0010	289.2730	0.9441
10	10.0	69.0952	0.0010	290.4393	0.9446
11	2.0	69.0952	0.0010	290.4393	0.9470
12	2.0	30.0000	0.0010	125.9125	0.4367
13	2.0	69.3403 5	0.0010	290.4393	0.9470
14	2.0	120.2101	0.0007	504.7042	1.5302
15	125.0	121.7811	0.0011	520.0078	1.5360

Table 5: Trabalho e Calor - Ciclo a Gas

Equipamento	W[kW]	Q[kW]	Condição
Compressor	258879.30	0	Recebe
Combustor	0	382060.70	Recebe
Turbina	422541.90	0	Realiza
Q. S.	0	127883.13	Recebe
Caldeira de R.	0	295650.68	Troca

Table 6: Trabalho e Calor - Ciclo a Vapor

Equipamento	W[kW]	Q[kW]	Condição
HP1	57746.40	0	Realiza
HP2	28495.58	0	Realiza
LP1	50830.21	0	Realiza
LP2	83542.88	0	Realiza
B1	213.27	0	Recebe
B2	3060.71	0	Recebe
Condensador	0	373959.00	Cede

Table 7: Trabalho e Calor - Ciclo a Vapor

Solução	Rendimento (%)
Ciclo a gás	0.4283
Ciclo a vapor	0.3675
Ciclo combinado	0.5340