

ANÁLISE TERMODINÂMICA DO SISTEMA COMPRESSOR- CALDEIRA-TURBINA A VAPOR PARA GERAÇÃO DE POTÊNCIA EM USINA TERMOELÉTRICA

Samuel Brito Ferreira Santos ¹
Luana Nascimento Silva ²
Tamires dos Santos Pereira ³

RESUMO

As usinas termoeletricas representam para o Brasil a reserva produtiva de energia elétrica, importante diversificação da matriz energética brasileira para períodos de estiagem que venham a comprometer a geração em usinas hidrelétricas. Este trabalho realiza uma avaliação da influência dos parâmetros pressão e temperatura na eficiência térmica de uma unidade de geração de potência modelada matematicamente com base na termodinâmica clássica do ciclo de Rankine. A planta apresentou uma eficiência térmica máxima calculada de 23,46%. As variações das variáveis temperatura e pressão na turbina a vapor resultaram em eficiências térmicas nas faixas de 38-42% e 42-49%, respectivamente. A variável temperatura apresentou uma menor influência sobre a eficiência, porém, ainda assim, resultou em uma eficiência térmica superior à capacidade instalada da planta termoeletrica. O trabalho permitiu simular, com fidelidade, uma planta de geração de potência de uma usina real por meio de conceitos termodinâmicos. Além disso, o trabalho possibilita observar variáveis que podem permitir a otimização do processo industrial estudado.

Palavras-chave: Termoeletrica, Ciclo de Rankine, Simulação.

INTRODUÇÃO

No que abrange a questão da produção de energia elétrica e, principalmente se tratando do Brasil, é notável a total dependência da matriz energética para com as usinas hidroelétricas. Estes tipos de usinas, por sua vez, têm sua geração determinada pelos regimes de chuva.

Com os períodos de estiagem enfrentados desde 2012, e crescente irregularidade dos índices pluviométricos no país, as usinas termoeletricas tem sido utilizadas como reservas para suprir o fornecimento de energia. Estas usinas utilizam máquinas térmicas, neste caso caldeiras, como força motriz para a ativação de turbinas e a geração de potências/energia elétrica.

¹ Graduando do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - PB, samuelbritof@gmail.com;

² Graduanda do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - PB, luana.nascimento25@hotmail.com;

³ Doutoranda do Curso de Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande - PB, tsantosp16@gmail.com;

Este trabalho visa a aplicação dos conceitos termodinâmicos da primeira e segunda lei da termodinâmica, como base para o ciclo de Rankine, em um sistema de geração de potência composto por uma caldeira, condensador, compressor e turbina a vapor, avaliados através da análise da influência dos parâmetros pressão e temperatura sobre a eficiência térmica de uma usina.

METODOLOGIA

1ª Lei da Termodinâmica

Segundo Koretsky (2013), enquanto a energia possa ser alterada de uma forma para outra, a quantidade total de energia (E) no universo é constante, sendo expresso pela Equação 1:

$$\Delta E_{univ} = 0 \quad (1)$$

Assim, a variação de energia do sistema deve ser igual à energia transferida através de sua fronteira para a vizinhança. Esta energia pode ser transferida por calor (Q), trabalho (W) e, em sistemas abertos, pela energia associada aos fluxos de massa de entrada e saída do sistema, sendo o balanço de energia expresso na Equação 2.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2)$$

Onde $\frac{dE}{dt}$ representa a variação de energia contida em um sistema no tempo t, \dot{Q} é a taxa líquida de transferência de calor no sistema e \dot{W} a potência líquida produzida pelo sistema.

2ª Lei da Termodinâmica

Segundo Moran e Shapiro (2006), a 2ª Lei da Termodinâmica permite prever a direção dos processos, estabelecer as condições de equilíbrio do sistema, além possibilitar a determinação do melhor desempenho teórico dos ciclos, motores e demais dispositivos térmicos, e é expressa pela Equação 3

$$\Delta s \geq 0 \quad (3)$$

Onde Δs é a variação de entropia de um sistema, onde esta depende da reversibilidade do processo. De forma diferencial, a mudança de entropia de uma substância ou processo, que seja reversível, é igual ao incremento de calor absorvido (δq_{rev}) dividido pela temperatura (T), Equação 4 (Koretsky, 2013).

$$ds = \frac{\delta q_{rev}}{T} \quad (4)$$

Ciclo de Rankine

O Ciclo de Rankine é considerado um tipo de ciclo ideal, com aplicação para uma unidade motora simples a vapor. Seja para uma usina termoelétrica, o Ciclo de Rankine realiza os seguintes processos em cada equipamento:

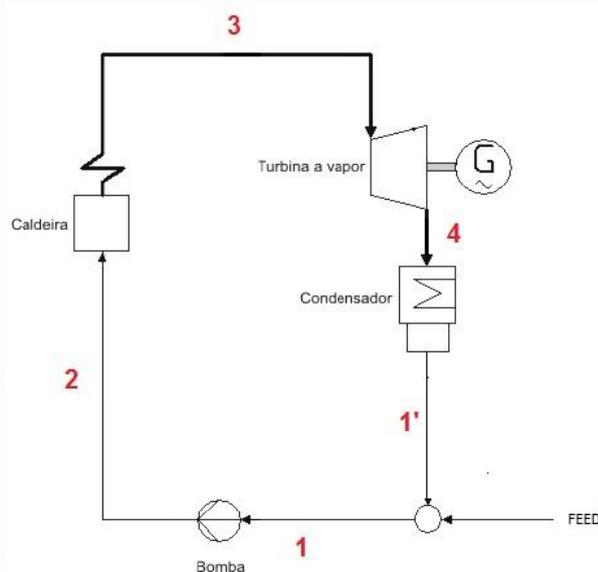
- Turbina a vapor: Expansão isentrópica do fluido de trabalho através da turbina;
- Condensador: Perda de calor do fluido de trabalho, tornando-o líquido saturado;
- Compressor: Compressão isentrópica do fluido até o estado de líquido comprimido;
- Caldeira: Transferência de calor para o fluido e geração de vapor.

DESENVOLVIMENTO

Estudo de caso

Para efeitos de avaliação da eficiência térmica de uma usina termoelétrica (UTE), foram utilizados os dados reportados por Fiomari *et al.* (2006) acerca da planta Destilaria Pioneiros, onde esta opera um sistema de cogeração, potência e calor. De forma a aplicar os conceitos do ciclo de Rankine ao sistema da UTE, foi realizada uma simplificação da planta de forma que o ciclo compreenda apenas a geração de potência para fins de produção de eletricidade. Assim, a planta foi adequada e encontra-se esquematizada na Figura 1.

FIGURA 1 – Sistema simplificado de geração de potência (Adaptado de Fiomari *et al.*, 2006)



Para o esquema da Figura 1, será considerada uma alimentação (FEED) mínima, de forma a manter as condições de pressão, entalpia, temperatura e vazão constantes; ou seja, considera-se um ciclo de produção de potência utilizando uma turbina a vapor.

Os parâmetros operacionais estão dispostos na Tabela 1, e foram adequados para as alterações na planta a partir dos dados de Fiomari *et al.* (2006), e condizem aos parâmetros adquiridos do sistema real vigente na UTE.

TABELA 1 – Parâmetros operacionais da planta simplificada (Adaptado de Fiomari *et al.*, 2006)

Pontos	\dot{m} (t/h)	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kgK)
1/1'	140,0	105	237	440,1
2	140,0	105,7	9200	452,5
3	140,0	530	6600	3486
4	140,0	148,1	237	2762

De modo análogo à planta em sua totalidade, o sistema de geração de potência, na sua forma mais simplificada, pode ser comparado ao ciclo proposto por Rankine. O ciclo representa quatro unidades básicas de processo para um sistema contendo turbina a vapor: a bomba/compressor, caldeira, turbina a vapor e o condensador. Todo o processo pode ser representado através de um diagrama Ts (Temperatura Vs. entropia), onde cada unidade é modelada considerando-se um estado estacionário, com processo reversível, e cada equipamento sendo um sistema aberto.

Equacionamento do Ciclo de Rankine

Considerando o processo com início na bomba/compressor, onde este seja descrito como um sistema aberto onde o processo ocorra de forma reversível e adiabática ($Q=0$), pode-se aplicar a 1ª Lei da Termodinâmica, onde se tem uma variação da energia cinética e potencial desprezada, Equação 5:

$$\dot{W}_{12} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (5)$$

Seja o processo, segundo o ciclo de Rankine, do tipo isentrópico e, ao aplicar a 2ª Lei da Termodinâmica junto à definição da propriedade entalpia (h), Equação 6, obtém-se a relação entre o trabalho executado pelo compressor com a variação de pressão entrada-saída, Equação 7.

$$Tds = dh - vdP \quad (6)$$

$$\dot{W}_{12} = \dot{m}(P_1 - P_2) \quad (7)$$

Após a passagem pelo compressor, o líquido de alta pressão é aquecido em uma caldeira, passando a ser um vapor superaquecido. Assim, o balanço entálpico para este equipamento, segundo a 1ª Lei, e desconsiderando as possíveis variações de energia cinética e da energia potencial no sistema, bem como a inexistência de uma resistência ao fluxo ($W=0$), sendo expresso pela Equação 8.

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (8)$$

O vapor superaquecido segue para uma turbina onde está é expandido e resfriado, realizando trabalho durante este processo. Assumindo que a turbina opera de forma adiabática, e onde as energias cinética e potencial sejam desprezadas, o trabalho pode ser expresso pela Equação 9.

$$\dot{W}_{34} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (9)$$

O vapor pós-expansão passa para um condensador, onde sai na forma de líquido saturado. No condensador ocorre a mudança de fase à pressão constante, sendo removida a energia da corrente, segundo a Equação 10.

$$\dot{Q}_{41} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (10)$$

Após os balanços de energia para cada um dos equipamentos, o ciclo de Rankine para o sistema pode ter o seu rendimento térmico (η) expresso pela Equação 11, podendo ser simplificado em função das entalpias da água em cada etapa do processo.

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_{23}} \quad (11)$$

Considerando a turbina a vapor como o objeto de estudo em decorrência de ser o gerador de potência no sistema, alguma das variáveis que afetam diretamente e de forma mais intensa ao processo são: a temperatura e a pressão, ambos para a entrada e a saída do equipamento.

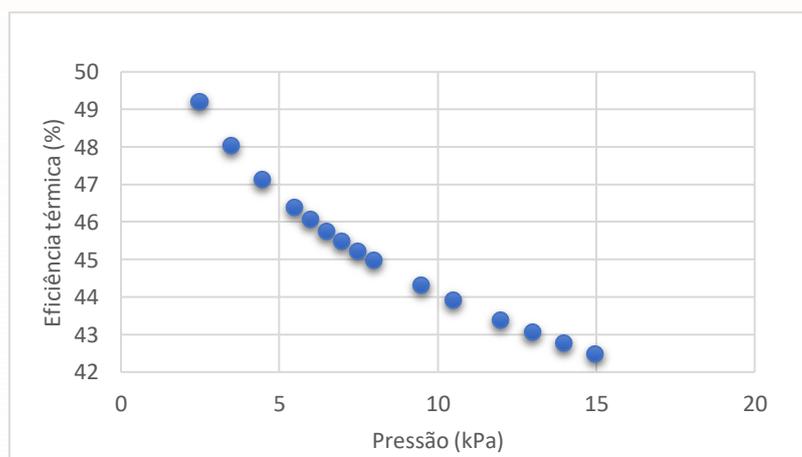
Para a realização da análise termodinâmica do comportamento do rendimento em função da variação de alguns dos parâmetros da planta, foi utilizado o software Excel e os dados referentes aos valores tabelados de entalpia e entropia obtidos a partir do software livre *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP)*, do Instituto Nacional de Padronização e Tecnologia (NIST) dos Estados Unidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foi avaliada a eficiência térmica máxima da planta simplificada, mediante a utilização da Equação 11, sendo observado um valor de 23,46% de eficiência máxima.

A influência, em específico, da variação da pressão de saída da turbina a vapor, mediante a utilização dos dados reportados por Fiomari *et al.* (2006), foi observada do ponto de vista do rendimento térmico máximo previsto para o processo de uma forma geral. Para isso, a turbina opera de forma isentrópica, como descrito pelo ciclo de Rankine. A Figura 2 apresenta o comportamento da eficiência térmica em função da variação da pressão de saída da turbina.

FIGURA 2 – Comportamento da eficiência térmica em função da pressão de saída da turbina



O aumento da pressão de saída na turbina indica um aumento da entalpia desta corrente, diminuindo a diferença entre as entalpias de entrada e saída do equipamento, como observado

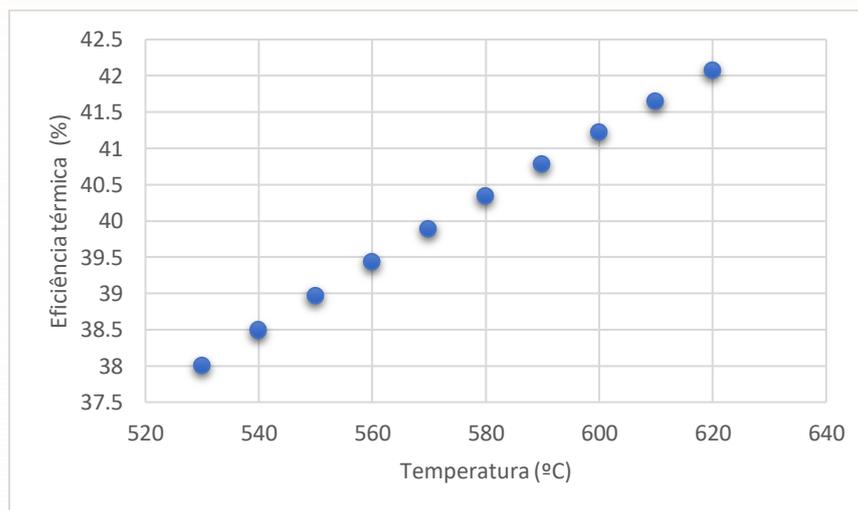
na Figura 2. Desta forma, acarreta na diminuição do rendimento do processo, uma vez que a potência gerada torna-se menor.

Comportamento semelhante foi observado no trabalho de Rocha *et al.* (2012), onde estes simularam o ciclo simples a vapor aplicado também à uma termoelétrica. Deste estudo, conclui-se que o menor rendimento seria decorrente da elevada pressão de saída na turbina, indicando uma menor expansão realizada e, conseqüentemente, um menor trabalho gerado.

Xavier *et al.* (2013) apresentou um estudo de caso de uma turbina a vapor utilizada por uma usina regida pelo ciclo de Rankine, com regeneração e uma caldeira multicomcombustível. O mesmo comportamento foi observado, sendo destacada a diminuição da potência real e função da menor expansão realizada, sendo esta decorrente da menor variação de entalpia no equipamento.

No que diz respeito à otimização do processo de geração de potência, é comum a utilização de superaquecedores localizados após a caldeira, de forma a produzir um vapor superaquecido e que resulte em uma expansão – trabalho gerado – maior. Assim, a Figura 3 apresenta o comportamento da eficiência térmica em função da temperatura do vapor na entrada da turbina.

FIGURA 3 – Eficiência térmica em função da temperatura de vapor na entrada da turbina



A Figura 3 apresenta uma relação direta no aumento do rendimento em função do aumento da temperatura de entrada do vapor na turbina. Esta relação tem um comportamento linear para a faixa de temperaturas avaliada, tendendo ao platô para temperaturas acima de 640°C. Observa-se também que seria necessário um aumento de aproximadamente 100 °C, na

temperatura do vapor de entrada da turbina, para que o processo possa alcançar uma melhoria de apenas 5% em seu rendimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível analisar situações reais em uma usina de cogeração de energia sob a ótica dos conceitos termodinâmicos e de máquinas térmicas.

Para o sistema estudado, conclui-se que para uma turbina a vapor, a variável pressão exerce maior influência sobre o rendimento do processo. O incremento da temperatura do vapor, seja para situações onde este seja superaquecido, agrega um custo ao processo que não viabiliza o baixo aumento da eficiência térmica do sistema.

REFERÊNCIAS

FIOMARI, M.C.; MASHIBA, M. H. S.; CAMPITELLI, F. M. ; ROCHA, G.; DIB, F. H.; RAMOS, R.A.V. . Análise Termodinâmica Aplicada aos Sistemas de Cogeração de Energia da Destilaria Pioneiros. In: V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2006, Recife. Anais do IV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2006.

KORETSKY, M. D. Engineering and Chemical Thermodynamics. 2nd, Ed. John Wiley & Sons, 2013.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 2ª ed. Ed. John Wiley, 2006.

ROCHA, G.; SILVA, A. L.; SILVA, F. A. Simulação de uma usina com ciclo simples a vapor. Revista Conexões, v. 9, 2012.

XAVIER, E. G. M.; MELLO, P. V.; CUNHA, R. P. C. Análise exergética de uma turbina a vapor. Trabalho de conclusão do curso, CEFET/RJ, 2013.