



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA  
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS – IEG  
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**MULLER GABRIEL DA SILVA CHAVES**

**A IMPORTÂNCIA DO REALIMENTADOR NA EFICIÊNCIA DE UM CICLO  
DE RANKINE UTILIZANDO O EES**

SANTARÉM

2020

**MULLER GABRIEL DA SILVA CHAVES**

**A IMPORTÂNCIA DO REALIMENTADOR NA EFICIÊNCIA DE UM CICLO  
DE RANKINE UTILIZANDO O EES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia para obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia na Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências.

Orientador: Carlos Célio Sousa Da Cruz

SANTARÉM

2020

## **A IMPORTÂNCIA DO REALIMENTADOR NA EFICIÊNCIA DE UM CICLO DE RANKINE UTILIZANDO O EES**

### **THE IMPORTANCE OF FEEDWATER HEATER ON THE EFFICIENCY OF A RANKINE CYCLE USING THE EES**

**Muller Gabriel da Silva Chaves**

Universidade Federal do Oeste do Pará

Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/7702853835432658>

**Carlos Eduardo Ribeiro Silva**

Universidade Federal do Oeste do Pará

Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/9904715808665794>

**Vitor Azevedo Pinto**

Universidade Federal do Oeste do Pará

Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/7321405317669336>

**Carlos Célio Sousa da Cruz**

Programa de Ciência e Tecnologia/UFOPA

Santarém – Pará

<http://lattes.cnpq.br/8929989531873951>

**Data de submissão:** 18/11/2019

**RESUMO:** O realimentador é um dispositivo pertencente a ciclos termodinâmicos, sua principal característica é de aumentar a eficiência do ciclo, pois sua presença é de vital importância nas termoelétricas, que por sua vez, são de imprescindível relevância no território brasileiro. O artigo tem como principal objetivo analisar a importância do realimentador e a eficiência em um ciclo de Rankine com finalidade de relacionar a pressão que entra no realimentador e as frações de vapor nas saídas da turbina com o rendimento. A metodologia utilizada durante o estudo foi montar um ciclo de Rankine isentrópico teórico com dados pré-estabelecidos para realizar uma simulação através do software EES. Para uma melhor compreensão da análise feita pelo software, foi calculado analiticamente o rendimento do ciclo original. Os resultados encontrados mostram que quanto menor for a pressão na entrada do realimentador maior será o rendimento do ciclo térmico. Além disso, mostra uma diminuição gradativa na eficiência quando a distribuição de fluxo de massa se dar a partir da turbina. A partir dessa pesquisa foi possível mensurar a eficiência do realimentador, mostrando os ganhos adquiridos com sua utilização, além da distribuição mais adequada do fluxo para melhorar o rendimento e a redução dos impactos ambientais ocasionados aos rios e lagos próximos de termoelétricas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência, ciclo de rankine, realimentador, EES.

**ABSTRACT:** The Feedwater Heater is a device belonging to thermodynamic

cycles, its main feature is to increase the efficiency of the cycle, because its presence is vital importance in thermoelectric, which in turn are indispensable relevance in the Brazilian territory. The article aims to analyze the importance of the feedwater heater and its efficiency in a Rankine cycle for the purpose to list the pressure entering from the feedwater heater and the steam fractions in the turbine outputs with efficiency. The methodology used during the study was to assemble a theoretical isentropic Rankine cycle with pre-established data for perform a simulation using the EES software. For a better understanding of the analysis made by the software, the yield of the original cycle was analytically calculated. The results found show that the lower the pressure at the feedwater heater inlet, results in a higher yield. In addition, it shows a gradual decrease in efficiency when the mass flow distribution is from the turbine. From this research it is possible to measure the effectiveness of the feedwater heater, showing the gains acquired from its use, as well as the most appropriate distribution of flow to improve yield and reduction of environmental impacts caused to rivers and lakes near thermoelectric.

**KEYWORDS:** Efficiency, Rankine Cycle, Feedwater Heater, EES.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Borgnakke e Sonntag (2017) o realimentador é um aquecedor e desareador da água de alimentação, esse equipamento tem duplo objetivo, o de aquecimento e o de remoção de ar da água de alimentação. A menos que o ar seja removido da água, pode ocorrer corrosão excessiva na caldeira.

De acordo com Çengel e Boles (2013) o aquecedor de água de alimentação também conhecido como realimentador é um equipamento que tem como função o pré-aquecimento de um fluido antes dele voltar a entrar na caldeira, ao realizar essa troca de calor adiciona energia ao fluido, exigindo uma menor quantidade de energia da caldeira para aquecer o fluido, ao fazer isso as perdas de energias são menores, pois, ao mesmo tempo em que perde energia ao passar de um dispositivo a outro, acaba-se ganhando no realimentador, assim maximizando a eficiência do ciclo.

O realimentador é utilizado quase que restritivamente em termoelétricas, que por sua vez são de extrema importância no território brasileiro, pois, de acordo com a ANEEL essa é a segunda maior fonte geradora de energia elétrica do país, produzindo 24,41% de toda energia produzida, esses dados nos remetem a diversos fatores importantes seja positivamente ou negativamente, como o econômico e ambiental.

Segundo Guerra e Carvalho (1995) o principal destaque negativo causado pela geração da termoelétricas são as emissões de gases e material particulado

na atmosfera, que nos remetem ao tema ambiental uma vez que tais gases estão relacionados as mudanças climáticas acarretadas pelos gases de efeito estufa e as consequentes negociações, em curso, sobre medidas de controle da emissão de CO<sub>2</sub>. Outro dano com bastante relevância é ocasionado pelo aumento na temperatura dos rios próximos onde estão instaladas as termoeletricas. Segundo Powers et al. (1979) as necessidades biológicas dos peixes estão correlacionadas a temperatura do ambiente onde vivem, caso haja uma mudança na temperatura de lagos ou rios a quantidade de oxigênio diminui, prejudicando a sobrevivência dos animais que vivem naquele habitat, esse efeito é conhecido como Lei de Henry.

Segundo Pariente (2015) a presença do realimentador é fundamental para minimizar os danos ao meio ambiente e a geração de energia elétrica, pois, influi consideravelmente na eficácia do sistema, permitindo uma melhor produção da usina, isso sem prejudicar ainda mais a natureza. A partir disso o presente artigo tem como objetivo estudar e analisar o potencial do realimentador a fim de mostrar sua utilização dentro de um ciclo de Rankine comprovando sua funcionalidade e junto a todos os seus ganhos.

## **2. DESENVOLVIMENTO**

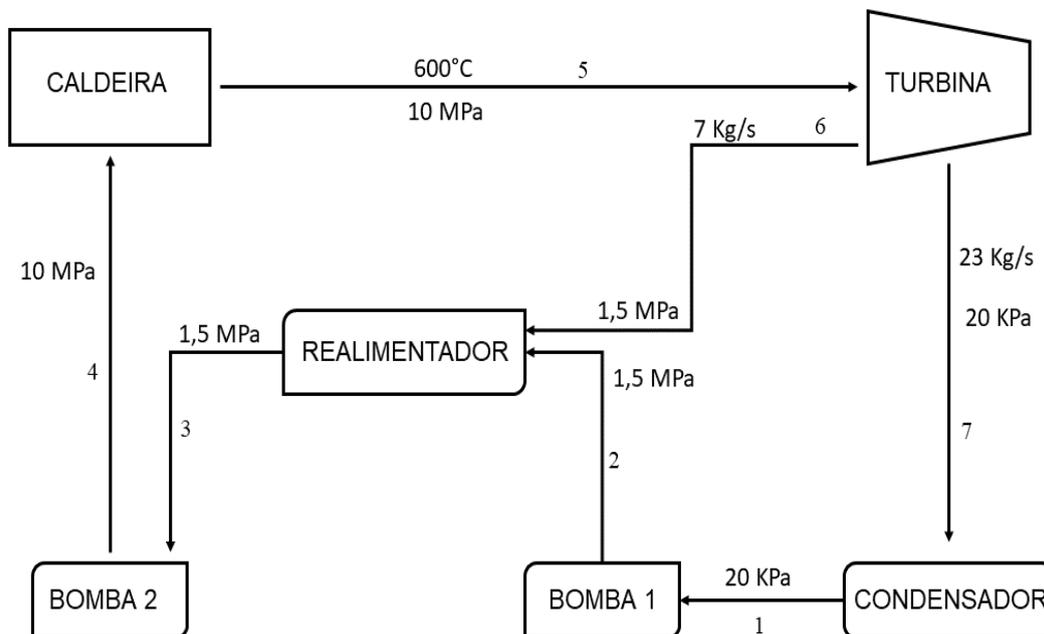
De acordo com o seguinte ciclo de Rankine com realimentador apresentado na figura 1, nele está presente uma caldeira, uma turbina a vapor, um condensador, duas bombas e um realimentador.

A figura 1 apresenta o ciclo de forma exemplificada e o seu funcionamento se dá da seguinte maneira: a caldeira aquece o fluido vindo da bomba 2 transformando o líquido comprimido em vapor superaquecido; após a sua saída da caldeira o fluido escoar para a turbina a vapor, no qual ela possui frações de vapor, ou seja, a maior parte do fluido vai para o condensador e a outra para o realimentador, gerando trabalho a partir do vapor que entra.

O condensador recebe parte do fluido vindo da turbina transformando a mistura líquido-vapor em líquido saturado. Logo após, o fluido segue para a bomba 1 onde é comprimido até entrada do realimentador. Parte do vapor é extraído nesse estado e enviado para o realimentador, enquanto o restante do

vapor continua se expandindo de forma isentrópica até o condensador. O fluido deixa o condensador como líquido saturado estando à pressão do condensador. Esse fluido condensado, entra em uma bomba isentrópica, no qual é comprimido e direcionado até o realimentador, onde se mistura ao vapor extraído da turbina. A fração de vapor extraída é tal que a mistura sai do realimentador como líquido saturado à pressão do aquecedor. Uma segunda bomba eleva a pressão do fluido até a pressão da caldeira. O ciclo se completa pelo aquecimento do fluido na caldeira até o estado de entrada da turbina.

**Fig. 1:** Ciclo de Rankine com realimentador



Fonte: Autor (2019)

## 2.1 OBJETIVOS

### 2.1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal do artigo é analisar a importância do realimentador de um ciclo termodinâmico e meios para alternativas para melhorar a eficiência através de simulações realizadas no software EES.

## 2.1.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- i) Analisar a eficiência do ciclo energético a partir do software EES.
- ii) Encontrar a relação da eficiência do ciclo com e sem a presença do realimentador, afim de comprovar a sua importância.
- iii) Avaliar a distribuição ideal da fração de vapor extraído da turbina.

## 3. METODOLOGIA

Para encontrar os objetivos do artigo deve-se compreender sobre a primeira lei da termodinâmica, que de acordo com Çengel e Boles (2013) uma das leis mais fundamentais da natureza é o princípio da conservação de energia e que durante uma interação, a energia pode mudar de uma forma para outra, mas que a quantidade total permanece constante, ou seja, a energia não pode ser criada ou destruída, isso dimensiona a relação entre os processos de um ciclo e a partir dela se pode compreender a interação entre cada equipamento pertencente ao esquema mostrado na figura 1. A equação 1 é a expressão numérica da primeira lei da termodinâmica.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{sai} \dot{m} \left( h + \frac{m.v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left( h + \frac{m.v^2}{2} + gz \right) \quad (1)$$

A equação 2 expressa o mesmo princípio, não obstante, relata a o processo por meio do fluxo de massa, em que demonstra que a massa que entra em um volume de controle é igual a massa que sai.

$$\sum \dot{m}_{entra} = \sum \dot{m}_{sai} \quad (2)$$

Para fazer as simulações no EES faz-se primeiramente o balanço de massa usando a equação 2 e em seguida o balanço de energia adequando cada equipamento de acordo com a equação. O cálculo foi feito de forma individual para cada elemento pertencente ao ciclo, porém, foi considerado o efeito de cada processo anterior influenciando o posterior.

Segundo Martinelli (2003) a caldeira é um aparelho térmico cujo objetivo

é produzir aquecimento de um fluido vaporizante. Para encontrar o calor que sai da caldeira, tem-se as seguintes considerações: não há geração de trabalho, energias cinéticas e potenciais são desconsideradas, além disso as entalpias foram retiradas do EES durante a simulação. Podemos assim calcular a troca de energia na caldeira a partir da seguinte equação:

$$\dot{Q}_{caldeira} = h_5 - h_4 \quad (3)$$

A turbina é o ponto posterior a caldeira, pois segundo Çengel e Boles (2013) à medida que o fluido escoar pela turbina as pás se movem realizando o trabalho de eixo. A turbina considerada no sistema possui duas saídas de massa, em uma o fluido sai como vapor superaquecido e em outra sai como mistura, indo diretamente para o condensador. Com isso, considera-se que haverá apenas geração de trabalho, portanto, será apenas desconsiderado a energia cinética e potencial, todas as entalpias atribuídas nas resoluções foram obtidas através do software EES e a partir das informações disponíveis obtém-se:

$$\dot{W}_{turbina} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \quad (4)$$

O sistema utiliza duas bombas em distintos momentos, de acordo Çengel e Boles (2013) o trabalho da bomba é utilizado e não gerado, com isso sabe-se que as bombas são apenas um dispositivo para as pressões, então não há calor nem trabalho gerado e as energias cinéticas e potenciais são desprezíveis, portanto, através da equação 5 e as considerações utilizadas para a bomba 1 obteve-se a seguinte equação para o trabalho:

$$\dot{W}_{bomba1} = (1 - y)v(P_2 - P_1) \quad (5)$$

Para a bomba 2, utilizou-se a equação 6:

$$\dot{W}_{bomba2} = v(P_4 - P_3) \quad (6)$$

O condensador é um trocador de calor, tendo a função retirar energia. Segundo Borgnakke e Sonntag (2017) o condensador retira calor do fluido, alterando seu estado. Neste processo torna-se a ignorar as energias cinéticas e potenciais envolvidas, analisando apenas as entalpias, através dessas

considerações, temos a seguinte equação:

$$\dot{Q}_{condensador} = (1 - y)(h_1 - h_7) \quad (7)$$

O rendimento do sistema de acordo com Moran et al. (2018) é encontrado buscando a relação entre o trabalho gerado e o calor dissipado, como o trabalho é gerado na turbina e consumido nas bombas, o rendimento se dar por:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{turbina} - (\dot{W}_{bomba1} + \dot{W}_{bomba2})}{\dot{Q}_{caldeira}} \quad (8)$$

As equações descritas foram utilizadas para escrever o código utilizado na simulação, contudo, para mostrar a significância da utilização do realimentador durante o ciclo, foi realizado uma comparação entre os ciclos em que os dois são diferidos pela presença do realimentador, o rendimento foi utilizado como parâmetro de comparação, sendo utilizado a equação 9.

Para traçar meios para avaliar a eficiência do sistema, foram modificados alguns pontos no ciclo ilustrado pela figura 1. Durante o processo foi alterado a pressão na entrada do realimentador, foram selecionadas dez pressões diferentes e correlacionado com o rendimento causado a partir da mudança. Também foram modificados outros parâmetros, sendo o fluxo de massa distribuído na saída da turbina, modificando em sete outras variáveis relacionando com a eficiência do ciclo.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para encontrar o calor de entrada na caldeira, utilizou-se as entalpias de entrada e saída desta, obtendo-se o seguinte valor:

$$\dot{Q}_{caldeira} = 2.654,1 \quad (kJ/kg)$$

Para encontrar o trabalho produzido pela turbina, foi utilizada a equação 4 com as devidas entalpias de entrada e saída juntamente com a fração de vapor, obtendo-se:

$$\dot{W}_{turbina} = 1142,39 \quad (kJ/kg)$$

Os trabalhos fornecidos pelas duas bombas foram calculados pelas equações 5 e 6, através de suas determinadas pressões de trabalho, obtendo-se:

$$\dot{W}_{bomba1} = 18,64 \quad (kJ/kg)$$

$$\dot{W}_{bomba2} = 8,9775 \quad (kJ/kg)$$

O calor de saída do condensador calculado a partir da equação 7 e com as determinadas entalpias de entrada e saída, obtém-se o valor de:

$$\dot{Q}_{condensador} = -1712,4 \quad (kJ/kg)$$

O rendimento foi calculado a partir da equação 9, encontrando o valor aproximado de:

$$\eta = 0,4325$$

O ciclo de Rankine com realimentador apresentou uma eficiência de 43,25 % quando comparado com o ciclo de Rankine ideal, ocorreu um aumento de 9,3 % de eficiência do ciclo como resultado da regeneração.

A tabela 1 mostra a relação de variação da pressão na entrada do realimentador com cinco pressões distintas e valores variando entre 3000 KPa à 2000 KPa com o rendimento do ciclo. Na tabela 1 percebe-se que a eficiência aumenta de acordo com a diminuição da pressão, demonstrando uma linearidade na relação entre ambas variáveis. Caso o realimentador não estivesse presente no ciclo, todo o fluxo de massa passaria pelo condensador diminuindo o rendimento.

**Tabela 1:** Análise de eficiência

<b>Pressão na entrada do realimentador (KPa)</b>	<b>Rendimento (%)</b>
<b>3000</b>	42,79
<b>2750</b>	43,01
<b>2500</b>	43,25
<b>2250</b>	43,51
<b>2000</b>	43,80

**Fonte:** Autor (2019)

A tabela 2 descreve a relação da fração de vapor que se expande

parcialmente na turbina e o restante até a pressão do condensador com a eficiência do ciclo térmico. A tabela 2 mostra que quanto maior for a fração de vapor  $y$ , menor será a eficiência no ciclo, pois o trabalho produzido na turbina é o fator preponderante na diminuição da eficiência do sistema térmico.

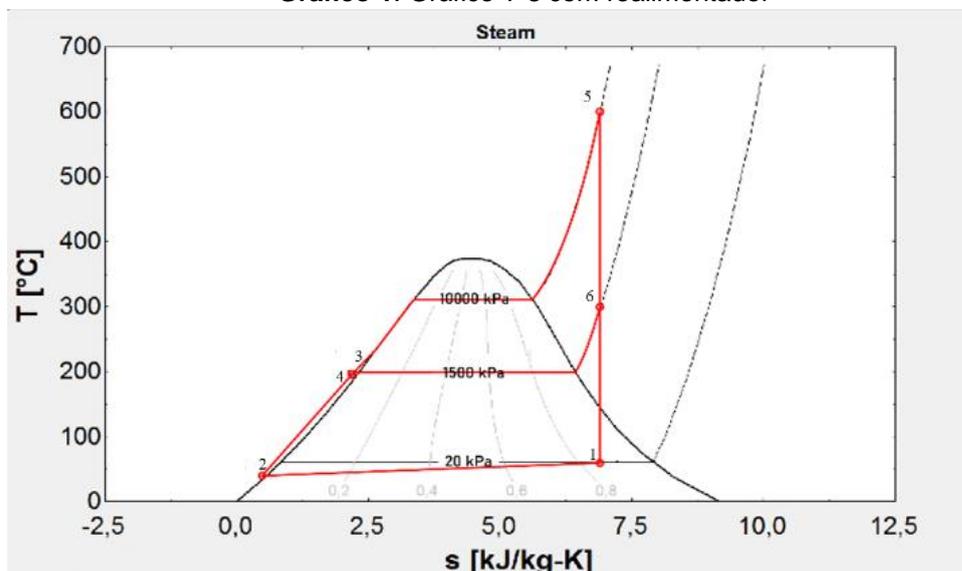
**Tabela 2:** Relação das frações de vapor com a eficiência

$y$	$1 - y$	Eficiência (%)
0,233	0,767	43,25
0,250	0,750	42,67
0,266	0,734	42,12
0,283	0,717	41,53
0,300	0,700	40,95
0,316	0,684	40,40
0,330	0,670	39,81

Fonte: Autor (2019)

Para fazer uma análise mais eficiente do ciclo, faz-se um gráfico T-s relacionando a temperatura com a entropia. O gráfico 1 revela que o calor transferido para o fluido de trabalho durante o processo do realimentador a caldeira diminui a temperatura média do processo de fornecimento de calor, portanto, a eficiência do ciclo. Caso não houvesse o realimentador no ciclo, parte do processo após a saída da turbina apresentaria valores de entropia maiores e demandaria mais energia para voltar ao estado inicial que resultaria na diminuição da eficiência do processo.

**Gráfico 1:** Gráfico T-s com realimentador



Fonte: Autor (2019)

## 5. CONCLUSÃO

Os objetivos mensurados foram alcançados através das simulações realizadas no software EES e os resultados obtidos demonstraram a influência do realimentador no ciclo. Foi mostrado que a mudança de pressão na entrada do realimentador influencia no rendimento do ciclo, uma vez que reduzida a pressão na entrada, por consequência, o rendimento também aumentará proporcionalmente.

Observou-se também que as mudanças na fração de vapor nas saídas da turbina ocasionaram um aumento significativo na eficiência do ciclo, pois, o valor extraído poderia ter produzido mais trabalho, mas seu efeito de elevar temperatura média do processo de fornecimento de calor é mais benéfico para a eficiência térmica.

Conforme o estudo foi possível obter uma melhor compreensão do funcionamento do ciclo e impactos energéticos decorrentes ao uso do realimentador. Porém, é importante ressaltar que a presença do realimentador não pode ser justificada economicamente, de acordo com Borgnakke e Sonntag (2017), pois os autores argumentam que a economia alcançada com o aumento do rendimento não compensaria o custo dos equipamentos adicionais como o realimentador, tubulações extras, nova bomba e etc. No entanto, devem-se considerar outras variáveis tão importantes quanto esta, como a ambiental devido a crescente conscientização ambiental. Não se deve ignorar, por exemplo, os benefícios ambientais que esses ciclos podem gerar com o ganho energético, pois as diversas entidades que compõem a sociedade têm reforçado cada vez mais a necessidade de tecnologias sustentáveis, e para alcançarmos tal objetivo todo ganho ecológico deve ser valorizado.

## REFERÊNCIAS

ANEEL, **Banco de Informação de Geração**. Brasil, 2019. Disponível em: <[www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm)> acessado em 10/07/2019 às 15:00 horas.

BORGNAKKE, Claus. SONNTAG, Richard. **Fundamentos da termodinâmica**, São Paulo, 2017.

ÇENGEL, Yunus. BOLES, Michael. **Termodinâmica**, Nova York, 2013.

GUERRA, Sinclair. CARVALHO, Antomar. **Um paralelo entre os impactos das usinas hidrelétricas e termoelétricas**. São Paulo, 1995.

MARTINELLI, Luiz. **Geradores de vapor**. Rio Grande do Sul, 2003.

MORAN, Michael. SHAPIRO, Howard. BOETTNER, Daisie. BAILEY, Margaret. **Princípio da Termodinâmica para Engenharia**. Nova Jersey, 2018.

PARIENTE, Marcos. **Efecto del nivel condensado en Feedwater heaters**. Léguas, 2015.

POWERS, Denis. MARTIN, Joseph. GARLICK, Robert. FYHN, Hans. FYHN, Unni. **O efeito da temperatura sobre os equilíbrios do oxigênio das hemoglobinas de peixe em relação à variabilidade térmica ambiental**. 1979.