

## 6

### Conclusões

Foi realizado no presente trabalho um estudo termodinâmico comparativo entre um ciclo Rankine com regeneração por pré-aquecimento (ciclo Rankine tradicional) e um ciclo Rankine com regeneração por etapas de injeção direta de vapor seguida de bombeamento bifásico (ciclo Rankine inovador). Um simulador termodinâmico (Gate Cycle ®) foi utilizado para se obter as propriedades termodinâmicas das correntes dos ciclos e as potências geradas em cada caso. Possíveis configurações para o ciclo modificado foram estudadas e a que obteve melhor eficiência energética foi comparada com o ciclo tradicional pela aplicação dos balanços de energia (Primeira Lei) e exergia (Segunda Lei).

O ganho de eficiência de Primeira Lei do ciclo inovador otimizado em relação ao ciclo tradicional é de 0,6%. Já a eficiência de Segunda Lei apresenta ganho de 0,35%. Conseqüentemente, o fluxo de irreversibilidade total do ciclo inovador (143,8 MW) é menor do que o fluxo total de irreversibilidade do ciclo tradicional (144,2 MW). A potência mecânica líquida produzida pelo ciclo tradicional é de 76,27 MW enquanto que no ciclo inovador é de 76,55 MW, em resumo, praticamente iguais.

A irreversibilidade no sistema de regeneração (entre a saída do condensador e a entrada na caldeira) para o ciclo tradicional é de 4.338 kW enquanto que para o ciclo inovador é de 3.836 kW. Estes resultados comprovam as alegações dos autores da patente quanto a menor irreversibilidade do sistema de injeção de vapor/bombeamento bifásico em relação ao pré-aquecimento por trocadores casco e tubo. No entanto, para as mesmas pressões de extração utilizadas no ciclo tradicional (alternativa 4 estudada no capítulo 4), as eficiências de 1ª e 2ª Leis obtidas foram menores que no ciclo tradicional. A alternativa 3, utilizando pré-aquecimento na seção de baixa pressão e injeção de vapor/bombeamento bifásico na seção de alta pressão obteve desempenho melhor que o ciclo tradicional. Na alternativa 5 foi proposta a variação do título da primeira mistura com o objetivo de maximizar a eficiência do ciclo. A alternativa que forneceu os melhores resultados foi a 5.1, analisada comparativamente com o ciclo tradicional no capítulo 4.

A análise de Primeira Lei para o ciclo como um todo aponta para o condensador como principal responsável pela ineficiência do ciclo. Porém, pela análise de Segunda Lei, pode-se perceber que ele é responsável por apenas 2% da irreversibilidade total. Os resultados mostram que apesar da eficiência de Primeira Lei da caldeira ser alta (91%), ela é a principal fornecedora de irreversibilidade do ciclo, sendo responsável por 88% da irreversibilidade total.

Quanto maior for o número de etapas de injeção de vapor/bombeamento, maior será a eficiência do ciclo, assim como acontece para os trocadores de calor de um ciclo Rankine tradicional. Um sistema otimizado levará a baixos títulos de mistura (após a injeção de vapor) com menores diferenças entre as pressões de sucção e descarga das bombas bifásicas e um maior número de etapas de injeção/bombeamento bifásico.

O trabalho consumido por uma bomba bifásica é maior que o consumido por uma bomba de líquido para as mesmas pressões de sucção e descarga. De fato, visualizando no diagrama T vs S (Figura 56), a diferença entre as entalpias  $h_4$  e  $h_3$  é menor que entre  $h_2$  e  $h_1$ .

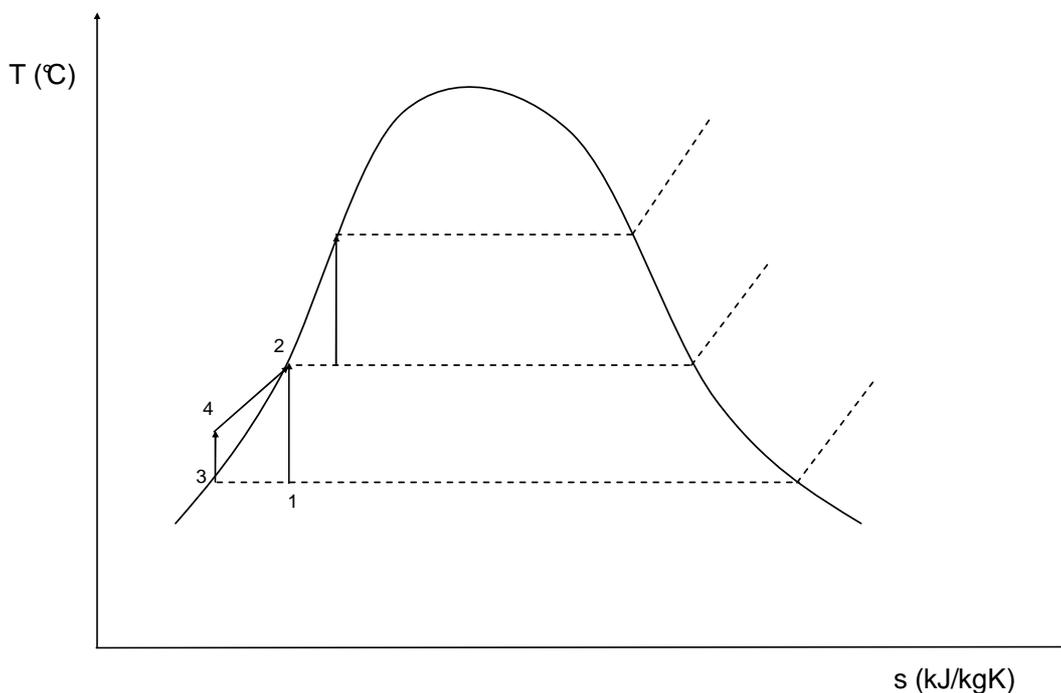


Figura 56- Diagrama T vs S- Comparação entre bombeamento bifásico e bombeamento de líquido

A maior eficácia do sistema de injeção seguida de bombeamento bifásico

ocorreu para pressões entre 7,65 e 20 bar. Na seção de baixa pressão, as razões de pressão são maiores, levando a maiores consumos das bombas bifásicas. Já na região de alta pressão, após a segunda etapa de injeção de vapor seguida de bombeamento bifásico, a temperatura da água de alimentação é de 255°C, que é a temperatura da água na entrada da caldeira no ciclo tradicional. Com isto, qualquer injeção de vapor adicional fará com que o economizador receba água mais quente e, com isto, o calor dos gases de exaustão não será aproveitado plenamente. Para maiores pressões de operação da caldeira, maiores pressões de injeção podem se tornar atraentes.

O ganho de eficiência do ciclo inovador em relação ao ciclo tradicional pode ser considerado pequeno mas, se avaliado do ponto de vista econômico, pode se tornar interessante, dependendo de uma análise econômico-financeira mais apurada.

Enfim, a aplicação da nova configuração de regeneração mostrou-se interessante do ponto de vista termodinâmico. A irreversibilidade adicionada ao ciclo Rankine pelo sistema de regeneração por pré-aquecimento é maior do que o sistema por injeção direta de vapor seguida de bombeamento bifásico. No entanto, as restrições de utilização na seção de baixa pressão devem ser consideradas.

Uma possível vantagem da implantação de um sistema operando segundo o ciclo inovador seria o espaço reduzido ocupado pelas bombas em comparação com os pré-aquecedores, além da menor quantidade de linhas de tubulação. Poderia haver um benefício também na construção civil, com a redução das dimensões do edifício da turbina e da altura do pedestal.

A implantação desta nova tecnologia depende da evolução da pesquisa e desenvolvimento em torno do processo de bombeamento de mistura bifásica. Os fabricantes de bombas, consultados a respeito, não apresentam interesse imediato em desenvolvimento na área de bombeamento bifásico água/vapor. Existe, no entanto, aplicação de bombas multifásicas (helico-axiais de simples estágio) na indústria petroquímica, para o bombeamento de misturas gás/óleo (de Salis, 1996).

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise termoeconômica do ciclo inovador, o que representaria uma complementação importante da avaliação da viabilidade de implantação da tecnologia.

Outra possibilidade é o estudo do processo de bombeamento de mistura bifásica água/vapor para aplicação em termelétricas. Este é um campo ainda pouco investigado e com grande potencial de evolução. O valor de eficiência isentrópica adotada para o bombeamento bifásico de 75% pode ser considerado conservativo. A evolução nas pesquisas nesta área pode aumentar significativamente os benefícios no ganho de eficiência com a utilização do ciclo inovador.

Sugere-se também que sejam realizados estudos de otimização das pressões de injeção, dos títulos de mistura e da quantidade de etapas de injeção/bombeamento bifásico, buscando-se maximizar o ganho de eficiência.