

ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE UMA PLANTA HÍBRIDA DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM CICLO RANKINE E CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO

Hugo Lima Moreira – hugolimabr@yahoo.com.br
Universidade do Estado do Pará – UEPA
Thiago Valente Novaes – valente.novaes@gmail.com
Centro de Perícias Científicas Renato Vhaves

Resumo. O presente trabalho faz uma análise termoeconômica em um sistema híbrido de uma planta de potência, funcionando segundo o ciclo Rankine, associado à captação de energia solar incidente através de espelhos parabólicos em um tubo receptor que transporta um fluido de transferência de calor. A substituição de energia fóssil por fontes renováveis como ciclos Rankine em consórcio com sistemas solares para geração de energia elétrica, é uma solução viável e em pleno desenvolvimento, por operar com uma fonte térmica com potencial térmico de utilizar energia limpa e renovável. Mesmo operando a uma temperatura, em torno de 400°C, essas plantas podem produzir energia elétrica com várias fontes de energias renováveis, como a solar, geotérmica, e recuperação de calor residual. Uma simulação em plataforma EES foi implementada para calcular os parâmetros exergoeconômicos considerando um ciclo com a capacidade de 4MW funcionando/operando com fonte solar. A análise exergoeconômica usou na metodologia SPECOC (Specific Exergy Cost), a qual se baseia na mensuração da exergia específica, eficiência exérgica, e equações auxiliares.

Palavras-chave: Energia Solar, Heliotermia, Termoeconomia.

1. INTRODUÇÃO

As abordagens teóricas de sistemas térmicos na maioria dos casos são sempre baseadas nas leis da conservação da massa e energia, e a determinação do coeficiente de eficiência é dada pela relação entre a energia pretendida e a energia gasta. Essa metodologia é conhecida como análise energética ou de Primeira Lei da Termodinâmica, tendo como base a análise no efeito quantitativo, não se preocupando com o qualitativo, nem com níveis de energia ou de temperatura em que os processos ocorrem. As plantas de Ciclo Rankine passam também por essa análise, porém no ciclo em estudo observou-se a inserção de concentradores solares para minimizar os custos monetários e exergoeconômicos.

O sistema estudado é um grande campo de receptores solares parabólicos necessários para capturar uma grande quantidade de energia baseado no sistema proposto por Klein e Nellis (2012). O óleo térmico que atua como fluido de transferência de calor é do fabricante DOW, e é aquecido à medida que flui através do campo de receptores solares e depois retorna à usina. Um permutador de calor é usado para transferir calor do fluido que circula pelos coletores para o fluido de trabalho usado no ciclo de potência, a fim de fornecer a energia que impulsiona o ciclo. O ciclo Rankine mostrado na Fig. 1 é usada para converter a energia térmica em energia elétrica. Esse ciclo utiliza reaquecimento e regeneração com aquecedores de água de alimentação aberto e fechado. O ciclo Rankine usa a água como fluido de trabalho. A pressão da caldeira é de 10 MPa. O fluido de transferência de calor que retorna do campo dos coletores solar está com a temperatura de 400°C. A planta rejeita o calor em um reservatório de temperatura em 30°C. Vamos otimizar as pressões de extração como parte desse problema. O fluido é extraído no estado 3 da turbina 1 no estado 1 a uma pressão de 1,1 MPa. A fração do fluxo alimentado ao aquecedor de água de alimentação fechado é f_1 . O fluido é subsequentemente extraído no estado 4 da turbina 2 a uma pressão de 0,25 MPa e é reaquecido. O fluido é finalmente extraído no estado 6 da turbina 3 a uma pressão de 0,1 MPa. A fração do fluxo extraído no estado 6 que alimenta o aquecedor de água de alimentação aberto é f_2 . O restante do fluxo passa pela turbina 4 para o condensador.

A metodologia exergoeconômica ou termoeconômica foi criada para fomentar a análise térmica e econômica de sistemas térmicos. Estas análises visam ratificar a viabilidade técnica e econômica de equipamentos e plantas industriais, as quais sempre produzem resultados confiáveis. Esse enfoque, também baseado nos conceitos de conservação, amplia a análise energética com a inclusão do uso da Segunda Lei e os conceitos de irreversibilidade e exergia.

A principal característica desta análise está na distribuição dos custos para o conteúdo exérgico, de um dado fluxo de energia. Esta análise apoia-se da determinação dos fluxos monetários associados aos fluxos exérgicos, sendo que, através de balanço de custos para cada equipamento se pode determinar os custos econômicos unitários para cada componente do sistema com intuito de otimizá-lo. No estudo deste ciclo, admitiu-se rendimento térmico para as turbinas 1, 2, 3, e 4, os rendimentos 0,87; 0,9; 0,92 e 0,93; e para as bombas 1, 2 e 3, os rendimentos, 0,65; 0,67 e 0,69, respectivamente.

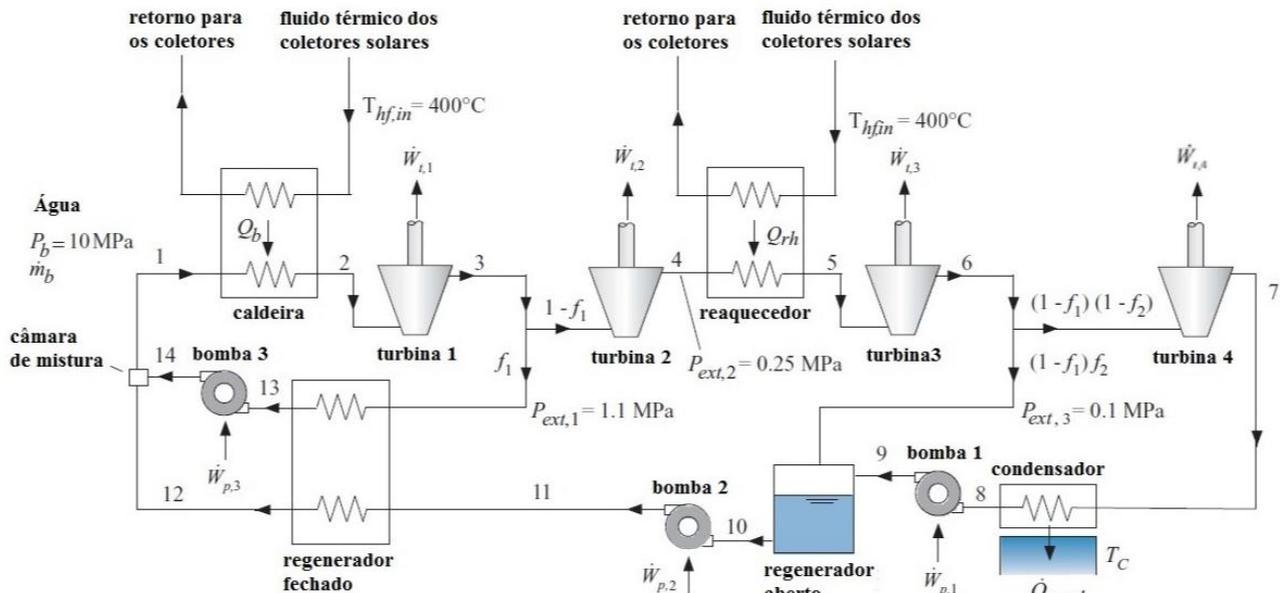


Figura 1 – Esquema da planta de potência do Ciclo Rankine com reaquecimento e regeneração (Klein and Nellis, 2012).

2. METODOLOGIA

A análise exergoeconômica tem como principais objetivos, dentre outros, determinar os custos exergéticos e monetários de todos os componentes do sistema; permitir o conhecimento e a compreensão do processo de formação destes custos; promover a otimização não só de variáveis específicas em cada componente do sistema, mas do sistema como um todo. Esta minuciosa análise é conseguida com a contribuição da Segunda Lei da Termodinâmica em conjunção com a análise exérgica, em que, segundo Tsatsaronis (1993), permitiria uma melhor medida para avaliação da magnitude de energia perdida em relação à energia total suprida sob a forma de insumo energético; permitindo ainda uma melhor medida da qualidade ou do desperdício do ponto de vista termodinâmico, e sendo uma boa variável para definir a eficiência racional para o sistema energético.

2.1 Análise Exergoeconômica

Tsatsaronis (1994) sintetizou esta análise baseado no conceito de *Fuel-Product*, propondo uma abordagem sistêmica em cada componente com intuito de gerar equações auxiliares necessárias aos cálculos dos custos exergéticos em cada fluxo. A esta metodologia chamaram de Análise Exergoeconômica, que compreende as seguintes etapas:

- Fazer um balanço exérgico em cada componente do sistema;
- Realizar uma análise econômica dos subsistemas;
- Obter o balanço de custos dos fluxos de energia em cada componente; e
- Calcular os parâmetros que permitam as análises dos processos associados a cada componente.

A valoração econômica dos fluxos termodinâmicos que percorrem um ciclo será efetuada para as condições de operação que serão posteriormente definidas, sempre com o enfoque para o aproveitamento da exergia disponível na captação da energia solar através de coletores.

A análise exergoeconômica combina a análise exérgica com princípios de economia, desenvolvida por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996). Os principais objetivos dessa análise é determinar os custos exergéticos e monetários de todos os componentes do sistema, permitir o conhecimento e a compreensão do processo de formação destes custos, além de promover a otimização não só de variáveis específicas em cada componente do sistema, mas do sistema como um todo.

Segundo Cavalcanti (2016), aplicar o método exergoeconômico consiste em atribuir custos às taxas exérgicas de um portador de energia e determinar o valor monetário de cada um dos fluxos. A taxa de custo é associada a cada fluxo.

2.2 Metodologia SPECOC (*Specific Exergy Cost*)

A teoria exergoeconômica foi desenvolvida ao longo dos últimos anos através de diferentes métodos, como por exemplo, Lozano e Valero (1993), desenvolveram o método da matriz de incidência. Inicialmente o método SPECOC, que se baseia na exergia específica, foi desenvolvida por Tsatsaronis e Lin (1990) e Lazaretto e Tsatsaronis (2006).

O método se baseia na exergia específica, custo do produto e do combustível por unidade de exergia, eficiência exérgica, e equações auxiliares. *Apud* Cavalcanti (2016), o método foi sintetizado por Lazaretto e Tsatsaronis (2006):

- Identificar os fluxos de exergia: como a exergia total foi didaticamente dividida em exergia mecânica e exergia térmica, esta última que envolve as exergias física e química, deve-se decidir como a exergia dos

componentes será avaliada, se de forma total ou rateada. Os resultados são mais precisos quando a exergia é rateada. Depois dessa decisão, todos os fluxos de entrada e saída de massa, calor, e trabalho, devem ser identificados e seus valores de exergia calculados;

- Definição de produto e combustível: as exergias do produto e do combustível são definidas se considerando que o resultado desejado a ser produzido pelo componente é a fonte fornecedora para gerar esse resultado. Casos mais complexos com o rateio da exergia em física e química, permitem aumentar a precisão dos resultados, como nos reatores de gaseificação, colunas de retificação etc. O produto seria definido como todos os valores de exergia na saída acrescida do aumento de exergia entre a entrada e a saída que esteja de acordo com a finalidade do componente (fluxo que recebeu exergia). Além de que, o combustível seria definido como todos os valores de exergia na entrada, acrescida da redução de exergia entre a entrada e a saída, e subtraída de todo aumento de exergia (entre a entrada e a saída) que não esteja de acordo com o propósito do componente;
- Equações de Custo: a exergoeconomia associa o custo de um sistema térmico com o ambiente e às suas irreversibilidades. Como em qualquer planta térmica o número de fluxos (m) é sempre maior que o número de componentes (n) ou subsistemas. Quando se defini uma matriz de incidência A ($n \times m$), percebe-se que se necessita de equações auxiliares. A diferença da metodologia *SPECO* é que ela utiliza o princípio do produto (P) e combustível (F).

Os dois princípios que se baseia a metodologia *SPECO*, o produto P e o combustível ou insumo F , são parâmetros relacionados ao fluxo de exergia dentro de um volume de controle (vc), sendo que o primeiro se refere ao fornecimento de fluxo de exergia dentro do volume de controle considerado, que afirma que cada unidade de exergia é fornecida para um fluxo associado ao produto no mesmo custo médio, chamado c_p . O segundo parâmetro se refere à remoção de exergia do volume de controle para a diferença entre a exergia de entrada e de saída tomando por definição a aplicação desse parâmetro para fomentar a exergia no vc . O princípio F determina que o custo específico (custo por unidade de exergia) associado a remoção de exergia deve ser igual ao custo médio específico do fluxo de entrada e de saída.

2.3 Equacionamento do Método *SPECO* e as Equações Auxiliares

O balanço de exergia fornece o valor da exergia destruída em cada componente do sistema e essa destruição é a diferença entre a exergia que entra e sai do volume de controle. Isso porque em processo real sempre haverá destruição e perdas resultando em uma exergia maior na entrada do processo, em relação à exergia do produto. Genericamente, se pode representar que as interações da exergia do produto são compostas da exergia dos insumos, a exergia das perdas externas e as irreversibilidades, conforme mostrado na Fig. 2.

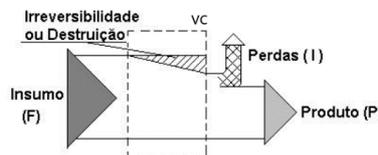


Figura 2 – Interações genéricas entre Insumo, Produto, Destruição e Perdas (Moreira, 2004).

O balanço exergético em cada componente pode ser expresso como:

$$Ex_P = Ex_F - I - Ex_D \quad (1)$$

A partir do conceito de eficiência exergética ou racional, que é a relação entre a variação exergética do produto e a variação exergética do insumo necessária ao processo, pode-se tomar o custo exergético unitário como sendo a relação inversa, ou seja:

$$k = \frac{\text{Exergia do Insumo}}{\text{Exergia do Produto}} = \frac{Ex_F}{Ex_P} = 1 + \frac{\text{Perdas(I)+Destruição(D)}}{\text{Produto (P)}} = \frac{Ex_i^*}{Ex_i} \quad (2)$$

Onde k é o custo energético unitário, Ex_i^* é a exergia necessária em [kW] para obter o produto desejado, e Ex_i é quantidade mínima de exergia em [kW] correspondente ao processo ideal para concepção do produto. Logicamente k será maior ou igual a unidade; em se tratando de um processo externamente reversível este fator tornar-se-á 1.

Tsatsaronis e Cziesla (2002) sistematizaram as equações auxiliares para os diversos componentes dos mais variados sistemas, as quais são aplicadas em função dos conceitos de insumo ou combustível (F) e produto (P). Ao longo do trabalho serão utilizadas as referidas equações auxiliares, aplicando-as caso a caso nos componentes analisados. Sabendo que:

$$\dot{C}_i = \dot{m}_i \cdot ex_i \cdot c_i \quad (3)$$

Onde \dot{C} é a taxa de custo, \dot{m} o fluxo mássico, ex_i a exergia específica e c_i o custo específico por exergia. O balanço de custo indica que o custo dos produtos é igual ao custo dos insumos da unidade mais o custo com investimento

$$\dot{C}_P = \dot{C}_F + \dot{Z}_{tot} = c_P \cdot Ex_P = c_F \cdot Ex_F + \dot{Z}_{tot} \quad (4)$$

3. FORMULAÇÃO ENERGÉTICA E EXERGEOCONÔMICA DO SISTEMA

A análise energética continua tendo grande validade para quantificar os fluxos de calor e mássicos que servem de base para as análises exérgicas e termoeconômicas dos sistemas térmicos. O método da análise exergoeconômica é particularmente apropriado para maximizar o uso eficiente da energia, já que ele permite a determinação de rejeitos e perdas em termos de sua localização, tipo e valores reais.

3.1 Equacionamento do Sistema a Vapor

O ciclo de potência a vapor analisado neste trabalho é ciclo *Rankine* regenerativo e com reaquecimento com aproveitamento de energia solar, conforme mostrado anteriormente. A taxa de irreversibilidade de um volume de controle em regime permanente é definida segundo a equação:

$$\dot{I}_{vc} = (\sum \dot{m}_e \cdot ex_e - \sum \dot{m}_s \cdot ex_s) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \cdot \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} \quad (5)$$

Onde o primeiro termo é a variação da exergia entrando e saindo do volume de controle, o segundo termo é o somatório da exergia do calor fluindo na fronteira do volume de controle na temperatura T_j , e o terceiro termo é a produção de trabalho pelo volume de controle. A exergia específica (ex) pode ser equacionada segundo a relação:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \quad (6)$$

Onde h e s representam a entalpia e a entropia específicas, respectivamente. O sobescrito 0 representa as propriedades termofísicas no estado de referência, e os dois últimos termos dizem respeito aos efeitos cinéticos e potenciais, que no trabalho foram ignorados.

A irreversibilidade para um líquido com calor específico (c_p) constante e fluxo mássico iguais na entrada e saída, como o óleo térmico empregado no concentrador solar pode ser avaliado pela equação abaixo:

$$\dot{I}_{vc} = \dot{m} \cdot \left[c_p \Delta T - T_0 \left(c_p \ln \frac{T_s}{T_e} \right) \right] + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} \quad (7)$$

A eficiência da planta térmica é definida pela relação entre o trabalho disponíveis nas turbinas e o calor absorvido nos coletores solares. Logo a eficiência térmica de primeira lei da Termodinâmica do ciclo é:

$$\eta_{planta} = \frac{\dot{W}_{turb1} + \dot{W}_{turb2} + \dot{W}_{turb3} + \dot{W}_{turb4} - \dot{W}_{bomba1} - \dot{W}_{bomba2} - \dot{W}_{bomba3}}{\dot{Q}_{concentrador1} + \dot{Q}_{concentrador2}} \quad (8)$$

Outra forma de mensurar a eficiência do sistema é determinar a eficiência global levando em consideração a contribuição dos coletores solares. Esta eficiência é a relação entre o trabalho líquido produzido pela planta térmica e calor absorvidos pelos coletores solares, ou seja:

$$\eta_{global} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_{solar}} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_{concentrador1} + \dot{Q}_{concentrador2}} \cdot \frac{\dot{Q}_{concentrador1} + \dot{Q}_{concentrador2}}{\dot{Q}_{solar}} = \eta_{planta} \cdot \eta_{solar} \quad (9)$$

Assim se determina a eficiência global do sistema pelo produto da eficiência da planta térmica e a eficiência do sistema de captação de energia solar.

3.2 Equacionamento do Concentrador Solar

Segundo Duffie e Beckman (1991) a estimativa da eficiência útil do coletor solar é definida conforme o balanço de energia no coletor solar. O coletor recebe uma radiação solar incidente direta, onde parte é perdida para o ambiente e parte por perdas ópticas, e o restante atinge o absorvedor do coletor. A Potência útil (P_u) e a potência perdida (P_p) são definidas como:

$$P_u = P_{abs} - P_p \quad (10)$$

$$P_p = P_{cov} - P_{rad} \quad (11)$$

A eficiência útil do ciclo pode ser representada através da relação, Eq. (12):

$$\eta_u = \eta_o \times \eta_t \quad (12)$$

A Fig. 3 representa o coletor e a partir do mesmo procede-se um balanço energético no concentrador de captação solar.

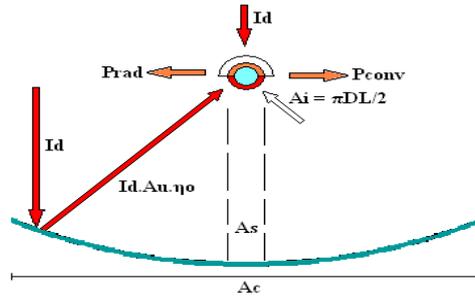


Figura 3. Fluxo de energia do concentrador cilindro-parabólico (Cavalcanti, 2016).

Onde:

I_d - Radiação solar direta instantânea coletada pelo sistema de captação [W/m^2]

P_{abs} - Potência máxima que chega ao tubo absorvedor [W]

P_{conv} - Potência perdida por convecção [W]

P_{rad} - Potência perdida por radiação para o meio ambiente [W]

η_o - Eficiência ótica do sistema de captação da energia solar [%].

η_t - Eficiência de conversão térmica ou rendimento térmico [%]

η_u - Eficiência útil de conversão [%]

$A_u = (A_c - A_s)$ - Área útil do concentrador [m^2]

A_c - Área total da superfície de captação solar [m^2]

A_s - Área sombreada pelo tubo absorvedor [m^2]

A_i - Área do absorvedor iluminada pela radiação refletida [m^2]

• Potência Útil:

$$P_u = P_{abs} - P_{perdidas} \quad (13)$$

• Potência Máxima Absorvida:

$$P_{abs} = I_d \cdot A_u \cdot \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t \quad (14)$$

Onde:

I_d - Radiação solar direta incidente [W/m^2]

A_u - Área útil do concentrador ($A_c - A_s$) [m^2]

ρ - Refletividade do concentrador [%]

k_{rd} - Fração da radiação refletida que chega ao absorvedor [%]

α_t - Absortividade do tubo absorvedor [%]

Potência Perdida:

$$P_{perdida} = P_{conv} + P_{rad} = \bar{h} \cdot A (T_{abs} - T_{\infty}) + \varepsilon A \sigma (T_{abs}^4 - T_{viz}^4) \quad (15)$$

Onde:

\bar{h} - Coeficiente de transferência convectiva [$W/m^2 \cdot K$]

$A = \pi DL/2$ - Área do tubo absorvedor onde ocorrem as perdas térmicas [m^2]

T_{abs} - Temperatura do tubo absorvedor [K]

$T_{\infty} = T_{viz}$ - Temperatura ambiente [K]

ε - Emissividade do tubo absorvedor

σ - Constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2 \cdot K^4$]

• Eficiência ótica:

$$\eta_o = \rho \cdot k_{rd} \cdot \alpha_t \quad (16)$$

• Eficiência térmica (rendimento térmico)

$$\eta_t = \frac{P_u}{I_d \cdot A_u \cdot \eta_o} = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (17)$$

• Eficiência útil

$$\eta_i = \eta_o \cdot \eta_t \quad (18)$$

• Fator de concentração geométrica:

$$C = A_u / A_i \quad (19)$$

Onde:

C - fator de concentração da energia solar
 A_i - área iluminada do absorvedor [m^2]
 $A_u = (A_c - A_s)$ - Área útil do concentrador [m^2]

A taxa total de incidência de radiação solar (\dot{Q}_{solar}) é o produto da área total dos coletores ($A_{coletor}$) pelo fluxo solar incidente (\dot{Q}_{solar}''), ou seja:

$$\dot{Q}_{solar} = A_{coletor} \cdot \dot{Q}_{solar}'' \quad (20)$$

3.3 Equacionamento dos Parâmetros Monetários

A metodologia para valoração dos custos monetários é uma aplicação de um balanço de custos a um subsistema ou equipamento com mostra a Fig. 4.

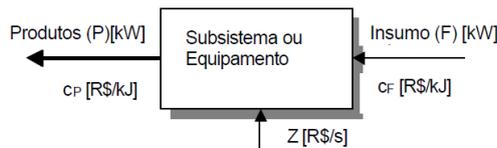


Figura 4. Balanço de custos monetários (Moreira, 2004).

A taxa de custo com despesas para o efetivo funcionamento do sistema engloba despesas totais compostas dos custos de aquisição com operação e manutenção, assim o custo total pode ser conseguido pela equação abaixo:

$$\dot{Z}_{tot} = \dot{Z}_{ope} + \dot{Z}_{man} \quad (21)$$

O balanço monetário da Figura 4 pode ser representado matematicamente como:

$$\dot{C}_P \cdot Ex_P = \dot{C}_F \cdot Ex_F + \dot{Z} \quad (22)$$

Sendo C_F e C_P os custos em unidade monetária por unidade de exergia para o insumo e o produto respectivamente, da mesma forma que Ex_F e Ex_P são as quantidades de exergia para o insumo e produto e Z é o capital investido. Para o caso particular de uma instalação já operando e estando paga, pode se tomar Z como sendo nulo, que não é o caso. Para determinação de Z tem-se:

$$\dot{Z}_i = \frac{3600 \cdot (A/P)}{t_{ope}} \cdot F_i \quad (23)$$

Onde o t_{ope} é o tempo de vida útil em segundos; F_i é o valor do investimento para cada equipamento ou subsistema; (A/P) é o fator de recuperação de capital e será calculado pela Eq. (21), sendo I a taxa de interesse (que varia de zero a 1); e N é o período de reembolso (em anos).

$$\left(\frac{A}{P}\right) = \frac{I \cdot (1+I)^N}{(1+I)^N - 1} \quad (24)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos a partir da simulação numérica em plataforma EES, atendendo a modelagem termodinâmica estabelecida na terceira seção, onde os parâmetros de entrada foram estabelecidos a partir dos pontos e dados indicados na Fig. 1, além de outros parâmetros retirados da literatura e informações de mercado, os quais são mostrados na Tab. 1:

Tabela 1 – Dados de entrada para simulação numérica

Parâmetros de Entrada	Sistema Rankine	Planta de Coletores Solares
Potência do sistema	$W_{T1} + W_{T2} + W_{T3} + W_{T4}$	4 MW
Fluido de Trabalho	Vapor de Água	DOWTHERM
Temperatura de Entrada	T_1	$T_{15} = T_{17} = 400^\circ\text{C}$
Área Total dos Coletores	-----	4000 m^2
Incidência Solar	-----	1000 W/m^2
Temperatura Ambiente	30°C	30°C

Tabela 2 – Parâmetros Termoeconômicos do Ciclo

Pontos	P [kPa]	T [K]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	ex[kJ/kg]	\dot{m} [kg/s]	B [kW]	B* [kW]
01	10000	455,9	779,8	2,154	142,5	1,127	160,6	1924
02	10000	713,2	3213	6,381	1316	1,127	1484	115,4
03	1100	457,3	2769	6,526	828,7	1,127	934,2	72,66
04	250	400,6	2532	6,592	572,3	0,9609	549,9	42,77
05	250	713,2	3213	8,238	762,8	0,9609	733	57,02
06	100	530,5	2989	8,06	591,1	0,9609	568	44,18
07	5,627	308,2	2511	8,177	78,48	0,8693	68,23	5,307
08	5,627	308,2	146,6	0,505	0,6124	0,8693	0,5324	0,04141
09	100	308,2	146,7	0,5051	0,7091	0,8693	0,6164	0,04795
10	100	372,8	417,5	1,303	33,8	0,9609	32,48	2,526
11	10000	374,7	432,9	1,316	45,14	0,9609	43,37	3,374
12	10000	455,3	777,1	2,148	141,5	0,9609	136	550,1
13	1100	457,3	781,4	2,179	136,5	0,1664	22,71	1266
14	10000	459,6	796	2,189	148,1	0,1664	24,64	1374
15	-----	673	300	2,8	236	74,65	17617	10,15
16	-----	708	263,2	3,8	113,2	74,65	8454	4,873
17	-----	673	300	2,8	236	26,72	6306	3,635
18	-----	713	275,5	3,8	125,5	26,72	3353	1,933

A Tab. 2 mostra a simulação do custo exergético B* que foi o mais oneroso nas correntes de entrada de geração de vapor, isso porque o fluido de trabalho recebeu as contribuições dos regeneradores, os quais também apresentaram um alto custo exergético pelo aporte de exergia do vapor advindo das turbinas. A análise dos custos monetários ficou prejudicada pela ausência dos valores monetários de aquisição dos equipamentos que compõem a planta e que não foram disponibilizados pelos autores.

A Fig. 5 mostra o rateio do custo exergético nos pontos que compõe a planta térmica, a qual revela que os maiores custos estão nas correntes na entrada da primeira caldeira (fluxo 1), na saída do aquecedor de regeneração fechado (fluxo 12), na outra saída do mesmo regenerador (fluxo 13), e na saída da bomba deste regenerador (fluxo 14). O alto custo exergético na entrada da caldeira é devido as adições ou acúmulos dos custos vindos do aquecedor de regeneração fechado e o custo do fluxo da bomba 3 (fluxos 12, 13 e 14). O segundo maior custo da planta é o da saída da bomba 3 (fluxo 14), por receber as contribuições da corrente da primeira saída do regenerador fechado (fluxo 13) e do custo do fluxo da bomba. Por último, o terceiro maior custo é na segunda saída do mesmo regenerador fechado (fluxo 12) que segue a tendência de custo alto neste componente. Percebe-se então que os maiores custos se concentram nos fluxos do regenerador fechado, isso porque, no processo de regeneração se verifica altas irreversibilidades, como grandes perdas de carga e a troca de calor com diferença finita de temperatura, ficando evidenciado que este componente deve ser o foco para melhoria da planta.

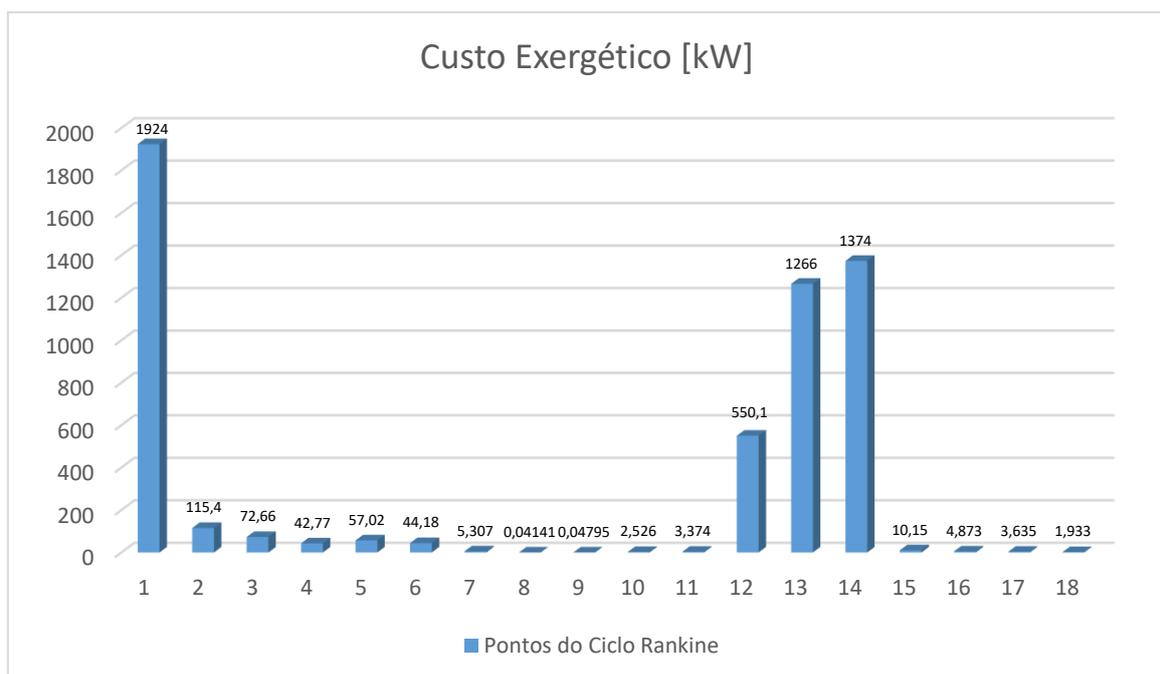


Figura 5 – Custo exergético dos diversos pontos do ciclo Rankine.

5. CONCLUSÃO

O trabalho revelou que a metodologia *SPECO* adotada é de grande valia por apresentar resultados confiáveis para tomada de decisão, visto que os fluxos mais onerosos se encontram na corrente de entrada de geração de vapor advindo do aquecedor fechado de água de regeneração onde se concentram as correntes de maiores custos exergéticos, o que sugere uma otimização, ou até mesmo a troca deste equipamento para que a transferência de calor, a qual é o objetivo deste componente, se processe de forma mais efetiva para consecução do melhor rateio da potência instalada e nos coletores solares.

REFERÊNCIAS

- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., 1996. Thermal Design and Optimization, New York, Ed. Wiley.
- Cavalcanti, E. J. C., 2016. Análise Exergoeconômica e Exergoambiental, Editora Edgar Blucher, São Paulo.
- Klein, S., Nellis G., 2012. Thermodynamics, Cambridge University Press, New York.
- Lazareto, A., Tsatsaronis, G., 2000. SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and cost in thermal systems. Energy, New York, v. 31, p. 1257-1289.
- Lozano, M., Valero, A., 1993. Theory of the Exergetic Cost. Energy, New York, v. 18, n. 9, p. 939-960.
- Moreira, H. L., 2004, Análise Termoeconômica de um Sistema de Refrigeração por Absorção, Tese de Doutorado, PPGEM, UFPB.
- Tsatsaronis, G., 1993. (quest editor) Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems. Energy Combust, v. 19, p. 227-257.
- Tsatsaronis, G., Czesla, F., 2002. Thermodynamics. Encyclopedia of physical Science and technology. v. 16. 3. Ed. New York: Academic Press. p. 659-680.
- Tsatsaronis, G., Lin, L., 1990. On Exergy Costing in Exergoeconomics. Computer-Aided Energy Systems Analysis, v. 21.

THERMOECONOMIC ANALYSIS OF A HYBRID ENERGY GENERATION PLANT WITH RANKINE CYCLE AND PARABOLIC SOLAR CONCENTRATOR

Abstract. *Present work makes a thermoeconomic analysis in a hybrid system of a power plant operated according to the Rankine cycle associated with the capture of incident solar energy through parabolic mirrors in a receptor tube that carries a heat transfer fluid. Replacing fossil energy with renewable sources such as Rankine cycles in consortium with solar system for power generation is a viable and well-developed solution, as it operates with a thermal source with thermal potential to use clean and renewable energy. Even operating at temperatures around 400°C, these plants can produce electricity from various sources of renewable energy such as solar, geothermal, and waste heat recovery. An EES platform simulation was implemented to calculate the exergoeconomic parameters considering a 4MW capacity cycle operating with solar source. Exergoeconomic analysis used the SPECO (Specific Exergy Cost) methodology, which is based on the measurement of specific exergy, exergetic efficiency, and auxiliary equations.*

Key words: *Solar Energy, Heliothermy, Thermoeconomic Analysis.*